



**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

2026 Том 27 № 2

DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-2

<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Научный журнал

Издается с 2000 г.

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-61174 от 30.03.2015 г.

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Главный редактор

Разумный Юрий Николаевич — доктор технических наук, профессор, директор инженерной академии, заведующий кафедрой механики и процессов управления инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

Заместитель главного редактора

Резник Сергей Васильевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции», факультет «Специальное машиностроение», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Ответственный секретарь

Агасиева Светлана Викторовна — кандидат технических наук, доцент кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

Члены редакционной коллегии

Агравал Бридж — профессор, Военно-морская школа, Монтерей, США

Алифанов Олег Михайлович — академик РАН, доктор технических наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

Варатараджу Ренугант — профессор, Университет Путра Малайзия, Серданг, Малайзия

Василе Массимiliano Л. — профессор, Университет Стратклайда, Глазго, Великобритания

Вивьяни Антонио — профессор, Университет Кампани «Луиджи Ванвители», Неаполь, Италия

Гасбарри Паоло — профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

Герман Анна — профессор, Университет Бейра-Интеритор, Ковильян, Португалия

Гитас Иоаннис Зоис — профессор, Университет Аристотеля в Салониках, Салоники, Греция

Грациани Филиппо — почетный профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

Гурфил Пини — почетный профессор, Израильский технологический институт, Хайфа, Израиль

Дэкс Мориба — доцент, Техасский университет в Остине, Остин, США

Дженга Джанкарло — профессор, Туринский политехнический институт, Турин, Италия

Кавазути Дзюньитиро — профессор, Японское агентство аэрокосмических исследований, Токио, Япония

Калугин Владимир Тимофеевич — доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Капустин Владимир Михайлович — доктор технических наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва, Российская Федерация

Кузнецов Николай Борисович — профессор, Геологический институт РАН, Москва, Российская Федерация

Лингарес Ричард — профессор, Массачусетский технологический институт, Кембридж, США

Матюшин Максим Михайлович — доктор технических наук, Центр управления полетами ЦНИИмаш, ГК «Роскосмос», Королев, Российская Федерация

Медведев Андрей Всеволодович — доктор физико-математических наук, член-корреспондент СО РАН, Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Российская Федерация

Мисра Арун — профессор, Университет Макгилла, Монреаль, Канада

Мортари Даниэле — профессор, Техасский университет А&М, Колледж-Стейшн, США

Мохаммед Сейду О. — профессор, Национальное агентство по космическим исследованиям и развитию, Абуджа, Нигерия

Палмерини Джованни — профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

Петухов Вячеслав Георгиевич — доктор технических наук, член-корреспондент РАН, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

Попков Юрий Соломонович — академик РАН, доктор технических наук, профессор, Институт системного анализа, ФИЦ «Информатика и управление» РАН, Москва, Российская Федерация

Попов Гарри Алексеевич — академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

Прадо Антонио — профессор, Национальный институт космических исследований, Сан-Жозе-дус-Кампус, Бразилия

Редько Иван Яковлевич — доктор технических наук, профессор, Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского, Москва, Российская Федерация

Спенсер В. Дэвид — профессор, Университет штата Пенсильвания, Университи-Парк, США

Фурфаро Роберто — профессор, Университет Аризоны, Тусон, США


Челани Фабио — профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

Черн Рок Ченг-Шинг — профессор, Университет Райерсона, Торонто, Канада

Ясака Тэцуо — почетный профессор, Университет Кюсю, Фукуока, Япония

**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)

Сайт журнала: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (открытый доступ) 

Периодичность: 4 выпуска в год (ежеквартально).

Языки: русский, английский.

Журнал индексируют: Белый список РЦНИ, РИНЦ, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Dimensions.

Цель и тематика

Журнал «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования» — периодическое международное рецензируемое научное издание в области авиационной и ракетно-космической техники, машиностроения. Журнал является международным по составу редакционной коллегии, авторам и тематике публикаций. В журнале публикуются результаты оригинальных научных исследований российских и зарубежных ученых.

Цели журнала:

- содействие развитию российских и зарубежных инженерных школ;
- продвижение и внедрение в практику современных перспективных разработок в указанных областях;
- научный обмен и сотрудничество между учеными.

Журнал входит в перечень изданий, публикации которых учитываются Высшей аттестационной комиссией России (ВАК РФ) при защите диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук по специальностям:

- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки);
- 2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки);
- 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки);
- 2.5.13. Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов (технические науки);
- 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов (технические науки);
- 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки).

Журнал адресован научным работникам, инженерам, аспирантам.

Выпуски журнала в полнотекстовом виде, правила оформления статей и дополнительная информация размещены на сайте <http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Редколлегия журнала строго придерживается международных стандартов публикационной этики, сформулированных в документе COPE (Committee on Publication Ethics): <http://publicationethics.org>

Редактор *И.Л. Панкратова*

Редактор англоязычных текстов *А.С. Корзин, Е.Ф. Шалева, Н.А. Алексеева*
Компьютерная верстка *Н.В. Маркеловой*

Адрес редакции:

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: publishing@rudn.ru

Адрес редакционной коллегии журнала

«Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования»:

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: engj@rudn.ru

Подписано в печать 23.06.2026. Выход в свет 30.06.2026. Формат 60×84/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 15,11. Тираж 500 экз. Заказ № 541. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН им. Патриса Лумумбы

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Тел.: +7 (495) 955-08-61; e-mail: publishing@rudn.ru



RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH

2026 Volume 27 Number 2

DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-2

<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Founded in 2000

Founder: Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

Editor-in-Chief

Yury N. Razoumny — Dr. (Technical Sciences), Professor, Director of the Academy of Engineering, Head of the Department of Mechanics and Control Processes of the Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

Associate Editor-in-Chief

Sergey V. Reznik — Dr. (Technical Sciences), Professor, Head of the Department SM-13 "Composite Materials for Aerospace", Special Machinery Faculty, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Assistant to the Editor-in-Chief

Svetlana V. Agasieva — Ph.D. (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

Editorial Board

Brij Agrawal — Professor, Naval Postgraduate School, Monterey, USA

Oleg M. Alifanov — Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. (Technical Sciences), Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

Fabio Celani — Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

Rock Jeng-Shing Chern — Professor, Ryerson University, Toronto, Canada

Roberto Furfaro — Professor, University of Arizona, Tucson, USA

Paolo Gasbarri — Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

Giancarlo Genta — Professor, Polytechnic University of Turin, Turin, Italia

Ioannis Zois Gitas — Professor, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

Filippo Graziani — Full Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

Anna Guerman — Professor, University of Beira Interior, Covilhã, Portugal

Pini Gurfil — Full Professor, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel

Moriba Jah — Associate Professor, University of Texas at Austin, Austin, USA

Vladimir T. Kalugin — Dr. (Technical Sciences), Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Vladimir M. Kapustin — Dr. (Technical Sciences), Professor, National University of Oil and Gas "Gubkin University" (Gubkin University), Moscow, Russian Federation

Junichiro Kawaguchi — Professor, Japan Aerospace Exploration Agency, Tokyo, Japan

Nikolay B. Kuznetsov — Professor, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Richard Linares — Professor, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA

Maxim M. Matyushin — Dr. (Technical Sciences), Mission Control Center (TSUP), Central Research Institute for Machine Building (TsNIIMash), State Space Corporation "Roscosmos", Korolev, Russian Federation

Andrey V. Medvedev — Dr. (Physical and Mathematical Sciences), corresponding member of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

Arun Misra — Professor, McGill University, Montreal, Canada

Seidu O. Mohammed — Professor, National Space Research and Development Agency, Abuja, Nigeria

Daniele Mortari — Professor, Texas A&M University, College Station, USA

Giovanni Palmerini — Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

Vyacheslav G. Petukhov — Dr. (Technical Sciences), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

Yury S. Popkov — Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. (Technical Sciences), Professor, Institute for Systems Analysis, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Harri A. Popov — Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. (Technical Sciences), Professor, Director of the Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

Antonio Prado — Professor, National Institute for Space Research, Sao Jose dos Campos, Brazil

Ivan Y. Redko — Dr. (Technical Sciences), Professor, Krzhizhanovsky Energy Institute, Moscow, Russian Federation

David B. Spencer — Professor, Pennsylvania State University, University Park, USA

Renuganth Varatharajoo — Professor, University Putra Malaysia, Seri Kembangan, Malaysia

Massimiliano L. Vasile — Professor, University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom

Antonio Viviani — Professor, University of Campania "Luigi Vanvitelli", Naples, Italy


Tetsuo Yasaka — Professor Emeritus, Kyushu University, Fukuoka, Japan

RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH

Published by the Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University)

ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)

Publication frequency: quarterly.

Journal homepage: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (Open Access) 

Languages: Russian, English.

Indexed by White List of RCSI, Russian Index of Science Citation, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Dimensions.

Aims and Scope

The RUDN Journal of Engineering Research — is a peer-reviewed international academic journal publishing research in the field of aviation and space technology, mechanical engineering. The journal is international in terms of the composition of the editorial board, authors and topics of publications. The journal publishes the results of original scientific research by Russian and foreign scientists.

The aims of the journal:

- assistance in the development of Russian and foreign engineering schools;
- promotion and implementation into practice of modern advanced technologies in these areas;
- scientific exchange and collaboration between scientists.

The journal website operates on the Portal of RUDN University scientific journals <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> and contains full information about the journal, editorial policy and ethics, requirements for the preparation and publication of the articles, as well as full-text issues of the journal since 2008 (Open Access).

Editorial Board strictly adheres to the international standards of publication ethics of the COPE:

<http://publicationethics.org>

Copy Editor *I.L. Pankratova*

English Texts' Editor *A.S. Korzin, E.F. Shaleeva, N.A. Alekseeva*

Layout Designer *N.V. Markelova*

Address of the editorial board:

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation

Ph.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: publishing@rudn.ru

Address of the editorial board of RUDN Journal of Engineering Research:

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation

Ph.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: engj@rudn.ru

Printing run 500 copies. Open price.

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

Printed at RUDN Publishing House:

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation

Ph.: +7 (495) 955-08-61; e-mail: publishing@rudn.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Ефременко И.А., Денисов О.В., Денисова Л.В. Расчетно-экспериментальное определение теплопроводности материала на натурной космической конструкции при локальном радиационном нагреве	137
Саирозль А., Демчева А., Чжан Ц. Оптимальное планирование траектории движения для колесных роботов	153
Nazarko I.A., Chizhikov A.P., Antipov M.S., Bazhin P.M. Development of a Technological Process for Producing and Investigation of Cermet Electrodes Based on TiC–NiCrAl and TiC–NiCrAlY (Разработка технологического процесса получения и исследование металлокерамических электродов на основе TiC–NiCrAl и TiC–NiCrAlY)	170
Пьянков В.В., Ковалева Е.А., Андреева Л.О., Алексеев В.В. Алгоритм адаптивного управления динамическими процессами организационно-технической системы в нейросетевом вычислительном базисе	182
Таст С.А., Мосева М.С. Сравнительный анализ объектных систем хранения данных с открытым исходным кодом Информатика, вычислительная техника и управление	193
Бунин Н.В., Сальников А.Ю. Методика прогнозирования ресурса силовых модулей преобразователей частоты на основе анализа эксплуатационных данных.....	203
Бойков А.А., Ромащенко М.Н., Назарова Ю.А. Адаптивный алгоритм децентрализованного управления инновационными проектами в условиях ограниченного ресурса внимания руководителя	215
Kukharskii M.I., Zhuravlev A.O., Andrikov D.A. Comparison of the Model and the Experiment of Synchronizing Two Shafts with a PID Controller Using Incremental Encoders and Frequency Converters (Сравнение модели и эксперимента синхронизации двух валов ПИД-регулятором с инкрементальными энкодерами и преобразователями частоты)	226
Доронин С.В., Рейзмунт Е.М., Филиппова Ю.Ф. Анализ возможности аналитической и численной суперпозиции нелинейных нагрузочных диаграмм спирально-тросовых виброизоляторов	237
Reza Kashyzadeh K., Ghorbani S., Said A. Finite Element Simulation of the 3D Printing Process for the Fabrication of Fatigue Test Specimens with Regard to Residual Stresses (Конечно-элементное моделирование процесса 3D-печати для изготовления образцов для испытаний на усталость с точки зрения остаточных напряжений)	249

CONTENTS

Efremenko I.A., Denisov O.V., Denisova L.V. Calculation and Experimental Determination of the Thermal Conductivity of a Material in a Full-Scale Space Structure Under Local Radiation Heating	137
Sairoel A., Al-Arazhi H.M., Zhang J. Optimal Path Planning for Wheeled Robots	153
Nazarko I.A., Chizhikov A.P., Antipov M.S., Bazhin P.M. Development of a Technological Process for Producing and Investigation of Cermets Electrodes Based on TiC–NiCrAl and TiC–NiCrAlY	170
Pyankov V.V., Kovaleva E.A., Andreeva L.O., Alekseev V.V. Algorithm for Adaptive Control of Dynamic Processes in an Organizational and Technical System Within a Neural-Network Computational Framework	182
Tast S.A., Moeva M.S. Comparative Analysis of Open-Source Object Data Storage Systems.....	193
Bunin N.V., Salnikov A.Yu. A Method for Predicting the Lifetime of Power Modules of Power Converters Based on the Analysis of Operational Data	203
Boykov A.A., Romashchenko M.N., Nazarova Yu.A. Adaptive Algorithm for Decentralized Management of Innovation Projects Under Conditions of Limited Managerial Attention Resources	215
Kukharskii M.I., Zhuravlev A.O., Andrikov D.A. Comparison of the Model and the Experiment of Synchronizing Two Shafts with a PID Controller Using Incremental Encoders and Frequency Converters	226
Doronin S.V., Reizmund E.M., Filippova Yu.F. Analysis of the Feasibility of Analytical and Numerical Superposition of Nonlinear Load-Deflection Curves of Helical Wire-Rope Vibration Isolators	237
Reza Kashyzadeh K., Ghorbani S., Said A. Finite Element Simulation of the 3D Printing Process for the Fabrication of Fatigue Test Specimens with Regard to Residual Stresses	249



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-2-137-152

EDN: КМУНQH

Научная статья / Research article

Расчетно-экспериментальное определение теплопроводности материала на натурной космической конструкции при локальном радиационном нагреве

И.А. Ефременко^{ORCID}, О.В. Денисов^{ORCID}, Л.В. Денисова^{ORCID}

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
✉ denisov.sm13@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 5 ноября 2025 г.
Доработана: 10 февраля 2026 г.
Принята к публикации: 15 февраля 2026 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта

При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Аннотация. Предложена методика определения теплопроводности в плоскости армирования композиционных материалов по данным тепловых испытаний натурных космических конструкций без нарушения их целостности. Методика предусматривает локальный радиационный нагрев с помощью галогенной лампы, тепловизионное измерение температурных полей и обработку экспериментальных данных с помощью решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности с учетом методических погрешностей. Объект исследования — рефлектор космической антенны из углепластика, разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана. При обработке экспериментальных термограмм искомая теплопроводность составила $\lambda = 19,2 \text{ Вт/(м}\times\text{К)} \pm 15 \%$. Показано, что результат существенно зависит от погрешности измерения температуры и точности задания координат контрольных точек (смещение на 1 мм приводит к заметному изменению оценок λ). Сопоставление с данными испытаний плоских образцов-свидетелей ($\lambda = 15,0 \text{ Вт/(м}\times\text{К)}$) демонстрирует расхождение порядка 28 %, которое может быть вызвано технологическими факторами изготовления, особенностями теплообмена в эксперименте и принятых допущений математической модели. Предложенный подход применим для крупногабаритных композитных оболочек сложной геометрии и может использоваться при тепловой отработке и верификации расчетных тепловых моделей космических конструкций.

Ключевые слова: коэффициент теплопроводности, тепловизор, рефлектор космической антенны, углепластик, измерение температуры, обратная задача теплопроводности

Вклад авторов

Ефременко И.А. — визуализация, валидация, написание текста; Денисов О.В. — концепция исследования, общее руководство, утверждение текста; Денисова Л.В. — визуализация, валидация, написание текста. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Благодарности

Авторы благодарят доктора технических наук, профессора С.В. Резника и доктора технических наук, профессора П.В. Просунцова за советы и ценные замечания при работе над данной статьей.

© Ефременко И.А., Денисов О.В., Денисова Л.В., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Для цитирования

Ефременко И.А., Денисов О.В., Денисова Л.В. Расчетно-экспериментальное определение теплопроводности материала на натурной космической конструкции при локальном радиационном нагреве // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 2. С. 137–152. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-137-152> EDN: КМҮНQH

Calculation and Experimental Determination of the Thermal Conductivity of a Material in a Full-Scale Space Structure Under Local Radiation Heating

Ivan A. Efremenko^{ORCID}, Oleg V. Denisov^{ORCID}✉, Liliana V. Denisova^{ORCID}

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
✉ denisov.sm13@mail.ru

Article history

Received: November 5, 2025
Revised: February 10, 2026
Accepted: February 15, 2026

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies.

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability

All data obtained during this study are included in the published article.

Abstract. A method is proposed for determining the in-plane thermal conductivity of composite materials in the reinforcement plane using thermal test data obtained from full-scale space structures without compromising their integrity. The method involves local radiative heating using a halogen lamp, thermal imaging measurements of temperature fields, and processing of the experimental data by solving a coefficient-based inverse problem of thermal conductivity, accounting for methodological errors. The object of the study is reflector of a carbon-fiber-reinforced plastic (CFRP) space antenna developed at Bauman Moscow State Technical University. When processing the experimental thermograms, the desired thermal conductivity was $\lambda = 19.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}) \pm 15\%$. It is shown that the result depends significantly on the temperature measurement error and the accuracy of the control point coordinates; a displacement of 1 mm leads to a noticeable change in the estimates of λ . A comparison with test data from flat reference specimens ($\lambda = 15.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) reveals a discrepancy of approximately 28%, which may be attributed to manufacturing process factors, heat transfer characteristics during the experiment, and the assumptions of the mathematical model. The proposed approach is applicable to large-scale composite shells of complex geometries and can be used in thermal testing and verification of computational thermal models for space structures.

Keywords: thermal conductivity coefficient, infrared thermography, carbon-fiber antenna reflector, carbon fiber reinforced plastic, temperature measurement, inverse heat conduction problem

Authors' contribution

Efremenko I.A. — visualization, validation, writing; *Denisov O.V.* — research concept, general guidance, approval of the text; *Denisova L.V.* — visualization, validation, writing. All authors read and approved the final version of the article.

Acknowledgements

The authors would like to thank Professor S.V. Reznik, Doctor of Technical Sciences, and Professor P.V. Prosuntsov, Doctor of Technical Sciences, for their advice and valuable comments while working on this article.

For citation:

Efremenko IA, Denisov OV, Denisova LV. Calculation and experimental determination of the thermal conductivity of a material in a full-scale space structure under local radiation heating. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(2):137–152. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-137-152> EDN: КМҮНQH

Введение

Композиционные материалы (КМ) нашли широкое применение в космической технике благодаря их высокой прочности, низкому весу и устойчивости к внешним воздействиям. Они

активно используются при создании силовых элементов космических конструкций (КК): рефлекторов космических антенн, каркасов напланетных транспортных систем, узлов телескопов и исследовательских аппаратов (рис. 1) [1–6]. Такие конструкции требуют высокой точ-

ности и стабильности размеров при эксплуатации в условиях вакуума и периодического нагрева излучением. Например, для современных высокоэффективных антенн отклонения от теоретической формы рефлектора не должны уменьшать коэффициент усиления сигнала более чем на 3,5 % [2]. Такую малую величину потерь можно обеспечить, если среднеквадра

тическое отклонение от теоретической формы твердотельного рефлектора не превышает $0,015 \lambda$, а для развертываемого — $0,02 \lambda$, где λ — длина волны [7; 8]. Поэтому для антенны с верхней границей рабочей частоты 60 ГГц допустимое отклонение профиля отражающей поверхности рефлектора не должно превышать 0,1 мм [9].



Рис. 1. Космические конструкции из КМ:
а — размеростабильная несущая конструкция объектива оптико-электронного комплекса [1];
б — антенна, состоящая из двух тонких композитных оболочек [2]; *в* — корпус КА Экспресс-2000 [3];
г — КА системы «КондорФКА»

И с т о ч н и к : выполнено И.А. Ефременко, О.В. Денисовым, Л.В. Денисовой.

Figure 1. Composite space structures:
a — dimensionally stable supporting structure of the lens of the optical-electronic complex [1];
b — antenna consisting of two thin composite shells [2]; *v* — body of the Express-2000 spacecraft [3];
r — spacecraft of the “Condor FKA” system [4]

S o u r c e : by I.A. Efremenko, O.V. Denisov, L.V. Denisova.

Как правило, объекты космической техники представляют собой тонкостенные конструкции, иногда с достаточно развитой площадью поверхности. Для обеспечения размерной стабильности КК должны быть ограничены температурные перепады и вызванные ими напряжения и перемещения [10–15].

При расчете температурного, а затем и напряженно-деформированного состояния КК

в пакете прикладных программ необходимы достоверные исходные данные о теплофизических характеристиках КМ. Углепластики характеризуются значительной анизотропией теплопроводности: значения вдоль и поперек плоскости армирования значительно различаются. Теплопроводность поперек плоскости армирования оказывает минимальное влияние на работу конструкции из-за малой термической

толщины и, как следствие, незначительных температурных перепадов в этом направлении.

Ключевое значение при тепловом проектировании имеет точность данных о теплопроводности в плоскости армирования. Именно в этом направлении возникают существенные температурные перепады (до 100 °С и более), определяющие термонапряженное состояние конструкции [16].

Традиционные методы определения теплопроводности, такие как метод лазерной вспышки и абсолютный стационарный метод, основаны на испытаниях стандартных образцов небольших размеров. Однако такие образцы чаще всего не являются представительными и не обеспечивают условия подобия для композитных конструкций со сложной геометрией и ярко выраженной анизотропией. Изготовление таких образцов из готовой КК может быть сопряжено со структурными изменениями или повреждением материала, а иногда и вовсе невозможно из-за нарушения требования к ее целостности. Тепловые испытания изготовленных по аналогичной технологии контрольных образцов КК могут содержать погрешность искомой теплопроводности из-за разных с КК напряженно-деформированных состояний. Поэтому необходимы методики, позволяющие измерять теплопроводность непосредственно на натуральных конструкциях.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработано семейство методик по определению теплопроводности в плоскости армирования элементов натуральных композитных КК с использованием контактного нагрева [17–21]. Температуры в заданных точках образца регистрируются термопарами и (или) тепловизором, а обработка экспериментальных данных производится на основе математического аппарата обратных задач теплопроводности (ОЗТ) [22]. Контактный метод нагрева хорошо зарекомендовал себя из-за простоты технической реализации, однако при обработке экспериментальных данных могут возникать погрешности вследствие неопределенности термических сопротивлений между поверхностями контакта. Этого недостатка лишен радиационный метод нагрева [23; 24].

Цель исследования — повышение точности определения теплопроводности в плоскости армирования КК на основе методики тепловых испытаний натурной композитной конструкции при локальном радиационном нагреве. Методика предусматривает использование галогенной лампы, измерение температуры с помощью тепловизора и обработку экспериментальных данных на основе решения коэффициентной ОЗТ.

1. Выбор параметров экспериментальной установки

Объектом исследований служил рефлектор, изготовленный по технологии вакуумной инфузии из эпоксидного компаунда Huntsman Araldite LY8615 US/XB 5173 Hardener и углеродной ткани Аспро-А80 (рис. 2). Конструкция представляет собой тонкостенный параболоид с пересекающимися ребрами жесткости в виде шестиконечной звезды (рис. 2, табл. 1) [14].

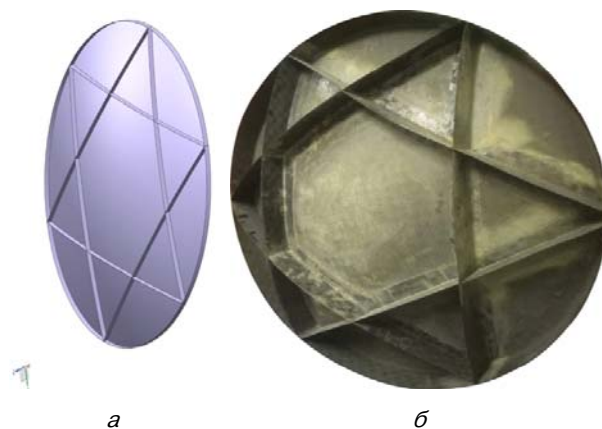


Рис. 2. Конструкция рефлектора: *а* — геометрическая модель; *б* — натурная конструкция
Источник: выполнено И.А. Ефременко, О.В. Денисовым, Л.В. Денисовой.

Figure 2. Reflector design: *a* — geometric model; *b* — full-scale design

Source: by I.A. Efremenko, O.V. Denisov, L.V. Denisova.

В качестве источника нагрева использовалась галогенная лампа OSRAM 64635 HLX со штатным отражателем, покрытым золотым напылением (рис. 3, табл. 2).

Таблица 1. Конструктивные параметры рефлектора /
Table 1. Design parameters of the reflector

Толщина ребер, мм / Rib thickness, mm	Толщина оболочки, мм / Shell thickness, mm	Высота ребер, мм / Height of ribs, mm	Масса рефлектора, кг / Reflector weight, kg	Максимальная термическая деформация, мм / Maximum thermal deformation, mm	Погонная плотность, кг/м ² / Linear density, kg/m ²
0,6	0,6	90,0	1,235	0,09	1,332

Источники: выполнено И.А. Ефременко, О.В. Денисовым, Л.В. Денисовой.
Source: by I.A. Efremenko, O.V. Denisov, L.V. Denisova.

Таблица 2. Характеристики лампы OSRAM 64635 HLX /
Table 2. OSRAM 64635 HLX lamp specifications

Характеристика / Characteristic	Напряжение, В / Voltage, V	Мощность, Вт / Power, W	Фокусное расстояние, мм / Focal length, mm	Длина, мм / Length, mm	Наружный диаметр, мм / Outer diameter, mm
Значение / Value	15	до 150 / up to 150	19	45	51

Источники: выполнено И.А. Ефременко, О.В. Денисовым, Л.В. Денисовой.
Source: by I.A. Efremenko, O.V. Denisov, L.V. Denisova.



Рис. 3. Галогенная лампа OSRAM 64635 HLX

Источники: выполнено И.А. Ефременко, О.В. Денисовым, Л.В. Денисовой.

Figure 3. Halogen lamp OSRAM 64635 HLX

Source: by I.A. Efremenko, O.V. Denisov, L.V. Denisova.

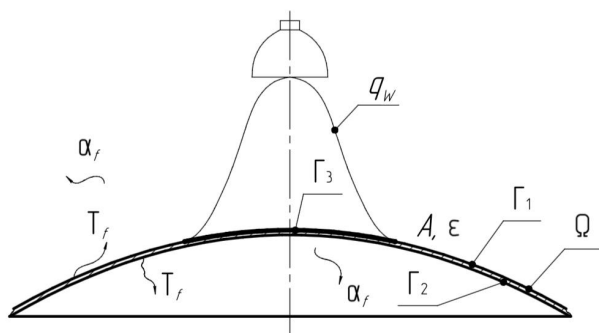


Рис. 4. Геометрическая модель

Источники: выполнено И.А. Ефременко, О.В. Денисовым, Л.В. Денисовой.

Figure 4. Geometric model

Source: by I.A. Efremenko, O.V. Denisov, L.V. Denisova.

На этапе подготовки тепловых испытаний необходимо выбрать параметры эксперимента: мощность нагревателя, диаметр пятна нагрева и размер рабочей зоны для тепловизионных измерений, расстояние от нагревателя до поверхности рефлектора.

Для моделирования тепловых процессов приняты следующие допущения. Рефлектор представляет собой тонкостенную параболическую оболочку толщиной h . На поверхность Γ_3 падает постоянный по времени тепловой поток от нагревателя плотностью q_w (рис. 4).

Пространственное распределение q_w известно, а его величина определяется мощностью нагревателя P , которая считается постоянной во времени τ и рассчитывается по формуле

$$P = UI, \tag{1}$$

где P — мощность галогенной лампы; U, I — напряжение и сила тока источника питания.

Учитывается собственное излучение рефлектора и самооблучение его отражающей поверхности Γ_2 . Материал рефлектора квазиизотропный, продольная теплопроводность во всех направлениях одинакова. Теплофизические ха-

рактические характеристики материала не зависят от температуры. Степень черноты ε и поглощательная способность A постоянны по всему спектральному диапазону и не зависят от температуры. Начальное распределение температуры T_0 и температура окружающей среды T_f известны. На фронтальной и тыльной поверхностях развивается естественная конвекция с коэффициентом теплоотдачи α_f .

Уравнение теплопроводности для элементов конструкции рефлектора в локальных системах координат имеет вид

$$c\rho h \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = h \left(\lambda_x \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2} \right) + q_p + E_{r,i} + q_{\text{conv}} + q_h, \quad (2)$$

где T — температура, τ — время, x, y — координаты на поверхности рефлектора, ρ — плотность материала, c — удельная теплоемкость, λ — коэффициент теплопроводности, h — толщина элемента.

Плотность собственного излучения q_p рассчитывается по закону Стефана — Больцмана:

$$q_p = \varepsilon \sigma_0 \left(T^4(x, y, \tau) - T_f^4 \right), \quad (x, y) = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3, \quad \tau \in]0, \tau_f]. \quad (3)$$

Плотность потока излучения $E_{r,i}$:

$$E_{r,i} = \varepsilon_i \sigma_0 \sum_{j=1}^N \Phi_{j,i} \varepsilon_j \left(T_i^4(x, y, \tau) - T_j^4(x, y, \tau) \right), \quad i \neq j, \quad (x, y) = \Gamma_2, \quad \tau \in]0, \tau_f]. \quad (4)$$

Плотность теплового потока, вызванного естественной конвекцией q_{conv} , описывается следующим уравнением:

$$q_{\text{conv}} = \alpha_f \left(T(x, y, \tau) - T_f \right), \quad (x, y) = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3, \quad \tau \in]0, \tau_f]. \quad (5)$$

Плотность поглощенного теплового потока от нагревателя q_h :

$$q_h = A q_w, \quad (x, y) = \Gamma_3, \quad \tau \in]0, \tau_f]. \quad (6)$$

Начальные условия:

$$T(x, y, 0) = T_0, \quad (x, y) \in \Omega, \quad (7)$$

где σ_0 — постоянная Стефана — Больцмана, A — коэффициент поглощения, ε — степень черноты, Φ_{ij} — разрешающий угловой коэффициент.

Пространственное распределение плотности теплового потока галогенной лампы OSRAM 64635 HLX было заимствовано из [25].

Для обоснования условий эксперимента необходимо выбрать такую мощность лампы и расстояние до поверхности нагрева, при которых перепад температуры в рабочей зоне составляет около 100 К, а максимальная температура рефлектора не превышает температуру разложения связующего.

Моделирование проводилось при следующих исходных данных материала рефлектора:

$$\begin{aligned} \lambda &= 31 \text{ Вт/(м·К)}; \\ C &= 1000 \text{ Дж/(кг·К)}; \\ \rho &= 1550 \text{ кг/м}^3, \\ A &= 0,735; \\ \varepsilon &= 0,85; \\ h &= 0,6 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Установлено, что при изменении мощности нагревателя от 5 Вт до 25 Вт максимальная температура поверхности рефлектора может составлять 330 и 430 К соответственно, а время эксперимента не превышает 150 с (рис. 5).

Температурное состояние рефлектора в зависимости от расстояния до источника нагрева мощностью 15 Вт показано на рис. 6 и 7. При расположении лампы на расстоянии менее 45 мм от поверхности рефлектора из углепластика есть опасность его перегрева и повреждения связующего. При расстоянии свыше 65 мм температурные перепады по поверхности рефлектора невелики, что будет негативно отражаться на точности обработки экспериментальных данных из-за влияния методических погрешностей.

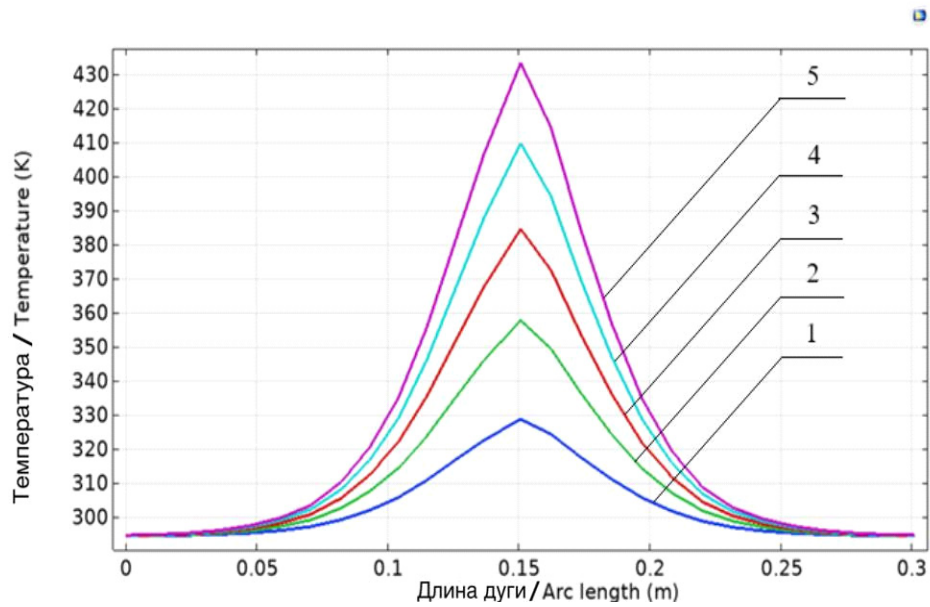


Рис. 5. Распределение температуры на поверхности рефлектора при нагреве в течение 150 с и мощности нагревателя:
1 — 5 Вт; 2 — 10 Вт; 3 — 15 Вт; 4 — 20 Вт; 5 — 25 Вт

Источник: выполнено И.А. Ефременко, О.В. Денисовым, Л.В. Денисовой.

Figure 5. Temperature distribution on the reflector surface during heating for 150 s and heater power:

1 — 5 W; 2 — 10 W; 3 — 15 W; 4 — 20 W; 5 — 25 W

Source: by I.A. Efremenko, O.V. Denisov, L.V. Denisova.

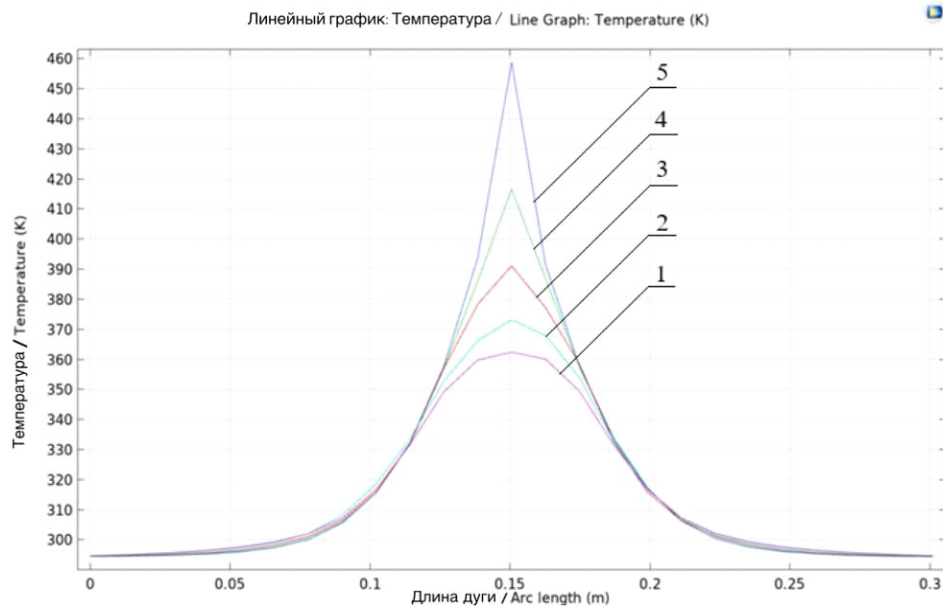


Рис. 6. Зависимость температуры поверхности рефлектора от расстояния до лампы при $\tau = 150$ с:

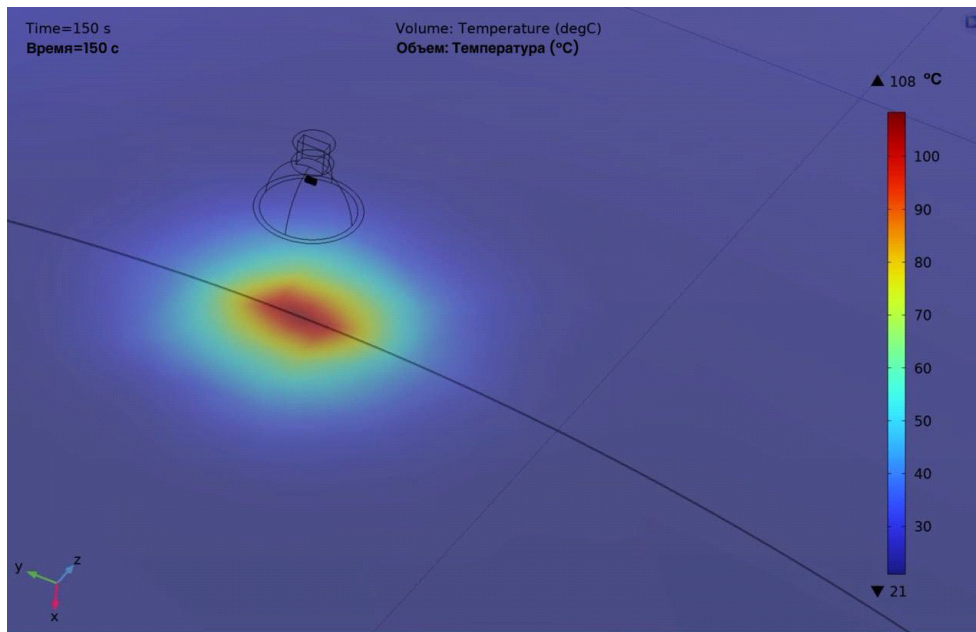
1 — 75 мм; 2 — 65 мм; 3 — 55 мм; 4 — 45 мм; 5 — 35 мм

Источник: выполнено И.А. Ефременко, О.В. Денисовым, Л.В. Денисовой.

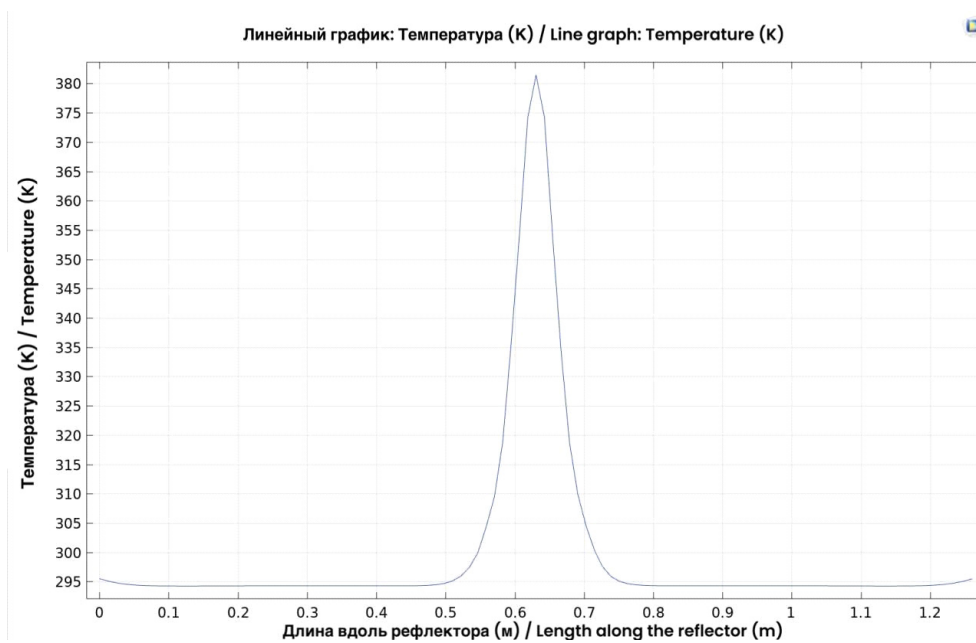
Figure 6. Reflector surface temperature as a function of distance to the lamp at $\tau = 150$ s:

1 — 75 mm; 2 — 65 mm; 3 — 55 mm; 4 — 45 mm; 5 — 35 mm

Source: by I.A. Efremenko, O.V. Denisov, L.V. Denisova.



a



б

Рис. 7. Распределение температуры на поверхности рефлектора при нагреве в течение 150 с и расстоянии 55 мм от лампы:
a — визуально в программе; *б* — температурный профиль вдоль длины поверхности рефлектора
 Источники: выполнено И.А. Ефременко, О.В. Денисовым, Л.В. Денисовой.

Figure 7. Temperature distribution on the reflector surface during heating for 150 s and at a distance of 55 mm from the lamp:
a — visually in the program; *б* — temperature profile along the length of the reflector surface
 Source: by I.A. Efremenko, O.V. Denisov, L.V. Denisova.

Таким образом, были выбраны следующие параметры экспериментальной установки: мощность нагревателя — 15 Вт, время — 150 с, расстояние до рефлектора — 55 мм, диаметр рабочей зоны — 180 мм.

2. Подготовка и проведение эксперимента

Для проведения тепловых испытаний был создан экспериментальный стенд, оснащенный подвижным кронштейном для регулировки положения галогенной лампы и изменения диаметра пятна нагрева. Под рефлектором установлен тепловизор SATIR-D300 на штативе, подключенный к компьютеру для регистрации температурных полей. Для питания системы использовался источник постоянного напряжения Mastech HY5005E-2 (рис. 8).

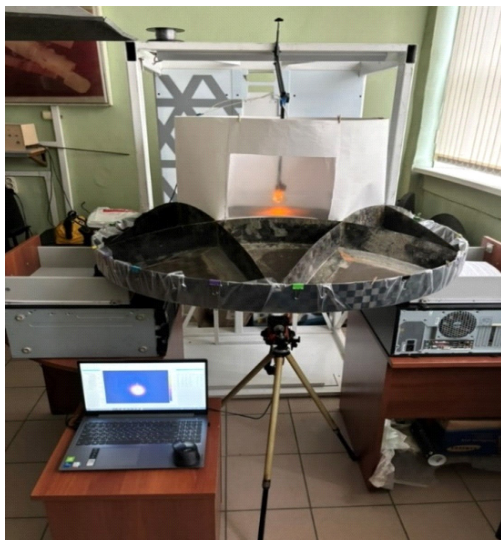


Рис. 8. Общий вид экспериментальной установки
Источники: выполнено И.А. Ефременко, О.В. Денисовым, Л.В. Денисовой.

Figure 8. General view of the experimental setup
Source: by I.A. Efremenko, O.V. Denisov, L.V. Denisova.

На радиоотражающей стороне рефлектора установлена камера спокойного воздуха с прозрачной пленкой для защиты объекта от неконтролируемых конвективных потоков. В центральной части пленки предусмотрено отверстие для тепловизионных измерений. На тыль-

ной стороне рефлектора устанавливалась камера спокойного воздуха с окном для визуального контроля тепловых испытаний (рис. 9).



a



б

Рис. 9. Камеры спокойного воздуха:
a — на радиоотражающей стороне рефлектора;
б — на тыльной стороне рефлектора
Источники: выполнено И.А. Ефременко, О.В. Денисовым, Л.В. Денисовой.

Figure 9. Chambers with still air:
a — on the radio-reflective side of the reflector;
б — on the back side
Source: by I.A. Efremenko, O.V. Denisov, L.V. Denisova.

Процесс нагрева образца регистрировался тепловизором, настроенным на значение излучательной способности 0,9. Термоизображения были оцифрованы и построены временные зависимости значений температуры поверхности рефлектора на расстояниях 0, 30, 60 и 90 мм от центра пятна нагрева (рис. 10).

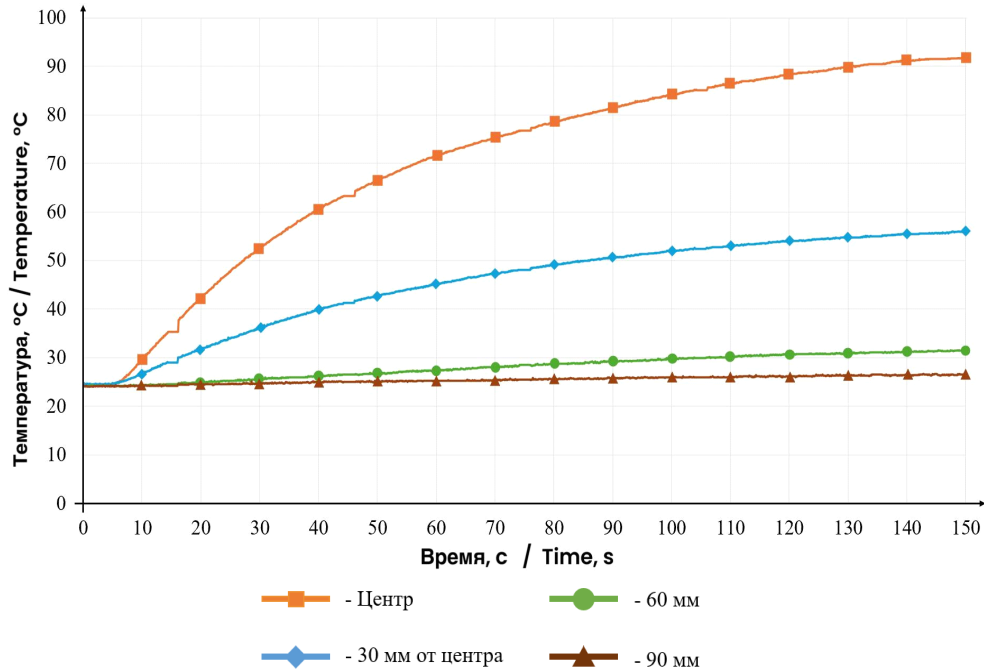


Рис. 10. Типичные экспериментальные термограммы
Источники: выполнено И.А. Ефременко, О.В. Денисовым, Л.В. Денисовой.

Figure 10. Typical experimental thermograms
Source: by I.A. Efremenko, O.V. Denisov, L.V. Denisova.

3. Постановка коэффициентной обратной задачи теплопроводности

Постановка ОЗТ заключалась в нахождении значения коэффициента теплопроводности материала, которое обеспечивается при минимуме квадратичного функционала невязки расчетных и экспериментальных температур в точках T_1, T_2, T_3 и T_4 на поверхности рефлектора (рис. 11). Плотность падающего потока q_w от нагревателя задавалась как граничное условие 2-го рода. Учитывались естественная конвекция и собственное излучение с поверхностей объекта испытаний.

$$\text{ср} \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_r}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial r} \right) + \lambda_z \frac{\partial^2 T(r, z, \tau)}{\partial z^2};$$

$$\Omega \in \Omega_1, \quad \tau \in]0, \tau_f]. \tag{8}$$

Начальные условия:

$$T(r, z, 0) = T_0, \quad (r, z) \in \Omega_1. \tag{9}$$

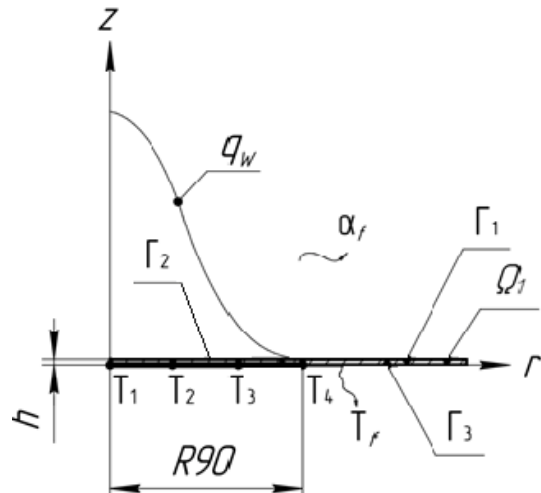


Рис. 11. Теплометрическая схема
Источники: выполнено И.А. Ефременко, О.В. Денисовым, Л.В. Денисовой.

Figure 11. Heat metering diagram of the experiment
Source: by I.A. Efremenko, O.V. Denisov, L.V. Denisova.

Граничные условия:

$$\lambda_z \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial z} = \alpha_f(r, \tau) (T(r, z, \tau) - T_f) - \varepsilon \sigma_0 (T^4(r, z, \tau) - T_f^4);$$

$$(r, z) \in \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3, \quad \tau \in]0, \tau_f]; \quad (10)$$

$$\lambda_z \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial z} = Aq_w(r),$$

$$(r, z) \in \Gamma_2, \quad \tau \in]0, \tau_f]; \quad (11)$$

$$-\lambda_r \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial r} = 0, \quad r = 0, \quad \tau \in]0, \tau_f], \quad (12)$$

где λ — коэффициент теплопроводности; z, r — координаты; Ω — область образца; Γ — поверхность образца.

Процесс решения ОЗТ структурирован в следующие этапы:

1. Аппроксимация температурной зависимости $\lambda(T)$ с помощью линейных базисных функций:

$$L(T) = \sum_{i=1}^n L_i f_i(T); \quad (13)$$

$$f_i(T) = \begin{cases} 1, & T = T_i \\ 0, & T \neq T_i \end{cases}, \quad (14)$$

где L_i — теплопроводность образца для соответствующей температурной точки T_i , которая является неизвестной величиной и вычисляется итерационно, n — количество базисных функций $f_i(T)$, T_i — температура в i интервале.

2. Минимизация функционала невязки методом градиентного спуска.

Вычисления прекращаются, когда достигается установленный критерий невязки, обеспечивающий правильность математической модели.

4. Результаты обработки экспериментальных данных и анализ погрешностей

В результате обработки экспериментальных данных искомое значение теплопроводности материала рефлектора составило $19,2 \pm 2,9$ Вт/(м·К). Это на 28 % выше, чем при испытаниях образцов-свидетелей на установке контактного нагрева [20], где $\lambda = 15,0$ Вт/(м·К). Возможные причины расхождения (физико-технологические, экспериментальные и модельные) рассмотрены в разделе «Обсуждение результатов».

Точность определения теплопроводности зависит от точности исходных данных и методики измерений. Экспериментальные термограммы имеют как случайные, так и методические погрешности. Наибольшее влияние на точность решения ОЗТ оказывают методические погрешности, возникающие вследствие ошибок тепловизионных измерений температуры, несовпадения расчетных и реальных точек измерений и плотности теплового потока от нагревателя, а также неопределенности степени черноты и коэффициента поглощения поверхности, удельной теплоемкости, коэффициента теплоотдачи.

Тепловизор SATIR D300, использованный в эксперименте, имеет погрешность ± 2 °С. Изменение температуры на ± 2 °С приводит к завышению или занижению искомой теплопроводности на 7,7 % (табл. 3)

Таблица 3. Влияние погрешности измерения температуры на точность решения ОЗТ /
Table 3. The influence of temperature measurement error on the accuracy of the Inverse Heat Conduction Problem (IHCP) solution

Погрешности измерений, °С / Measurement errors, °С	+1	+2	-1	-2
Расчетные значения теплопроводности λ , Вт/(м·К) / Calculated values of thermal conductivity λ , W/(m·K)	20,34	20,74	18,28	17,81

Источники: выполнено И.А. Ефременко, О.В. Денисовым, Л.В. Денисовой.
Source: by I.A. Efremenko, O.V. Denisov, L.V. Denisova.

Неточность позиционирования точек измерения на ± 1 мм приводит к значительным изменениям коэффициента теплопроводности

λ (табл. 4). Смещение точки T_2 на 1 мм к центру пятна нагрева увеличивает расчетное значение теплопроводности λ на 14,9 %.

Таблица 4. Влияние неточности позиционирования на точность решения ОЗТ /

Table 4. The effect of positioning inaccuracy on the accuracy of the IHCP solution

Погрешности позиционирования T_2 и T_3 , мм / Positioning errors T_2 and T_3 , mm	$T_2 + 1$	$T_2 - 1$	$T_3 + 1$	$T_3 - 1$
Расчетные значения теплопроводности λ , Вт/(м·К) / Calculated values of thermal conductivity λ , W/(m·K)	17,85	22,14	17,56	21,82

Источник: выполнено И.А. Ефременко, О.В. Денисовым, Л.В. Денисовой.
Source: by I.A. Efremenko, O.V. Denisov, L.V. Denisova.

5. Обсуждение результатов

Расхождение результатов настоящей работы с результатами, полученными на плоских образцах-свидетелях при контактном нагреве, является ожидаемым для КМ при переходе от лабораторных образцов к реальным конструкциям и требует отдельного анализа факторов, влияющих на определение искомой λ .

1. *Физико-технологические факторы.* На натурной криволинейной оболочке рефлектора возможны локальные отличия структуры от плоских образцов-свидетелей: драпировка и волнистость армирующих слоев при формировании на криволинейной оснастке, изменение ориентации и объемной доли волокон; локальные неоднородности, связанные с технологией изготовления (например, распределение связующего, пористость, неравномерность толщины); а также влияние конструктивных элементов (ребра жесткости, утолщения, клеевые/стыковые зоны), которые изменяют реальный путь теплопереноса в зоне локального нагрева. В сумме это может приводить к отличию теплопроводности, определяемой по температурному полю натурной конструкции, от значения, полученного на плоских вырезках.

2. *Экспериментальные факторы.* Локальный радиационный нагрев на криволинейной поверхности формирует неидеальное распределение поглощенного потока: меняются угол падения и расстояние до нагревателя по пятну,

что приводит к перераспределению плотности потока и возможной асимметрии нагрева; существенен вклад естественной конвекции и собственного излучения, которые зависят от ориентации и кривизны поверхности; ИК-измерение температуры чувствительно к степени черноты и отраженному фону, причем эффективная ε может зависеть от угла наблюдения. Неопределенность коэффициента теплоотдачи в периферийной части рефлектора может вызывать дополнительный теплоотвод с рабочей зоны локального нагрева, что при обработке экспериментальных данных приводит к завышенной величине искомой теплопроводности λ . Следует отметить высокую чувствительность результата от погрешности позиционирования контрольных точек: смещение точки T_2 на 1 мм к центру пятна нагрева изменяет расчетное значение λ на 14,9 % (табл. 4).

3. *Модельные факторы.* При решении коэффицентной ОЗТ принимаются допущения, которые могут давать систематический вклад в восстановленное значение λ : задание усредненного граничного условия 2-го рода для плотности падающего потока q_w и его распределения по пятну нагрева; использование постоянных (или усредненных) параметров радиационного и конвективного теплообмена (A , ε , α_f), которые в реальном эксперименте могут изменяться по поверхности и во времени; геометрические упрощения натурального объекта при построении расчетной модели (идеализация оболочки,

пренебрежение локальными особенностями — ребрами/утолщениями); а также выбранная аппроксимация $\lambda(T)$ линейными базисными функциями.

Перспективы развития методики заключаются в переходе от эмпирического выбора точек измерения T_1 – T_4 к процедуре оптимального планирования измерений. Для снижения расхождений и повышения воспроизводимости целесообразно проводить калибровку ϵ и отраженного фона; а также расширить модель до 3D-геометрии натурального объекта с учетом ребер и локальных утолщений.

Заключение

Разработана методика определения теплопроводности композиционного материала на натуральных композитных КК, которые представляют собой геометрически, структурно и технологически подобные предметные модели. Методика апробирована на тонкостенном композитном рефлекторе с использованием локального радиационного нагрева и регистрацией температурного поля на его неосвещенной поверхности с помощью тепловизора. Обоснованы условия тепловых испытаний: расстояние до нагревателя — от 45 до 65 мм, мощность галогенной лампы 15...20 Вт, диаметр рабочей зоны — до 180 мм, время эксперимента — 150...200 с. Методика применима для конструкций с продольными размерами не менее 150–200 мм и толщиной до 2 мм.

Методика открывает новые возможности определения теплофизических характеристик КМ в процессе реализации проектного облика изделия и технологии его изготовления, что позволит повысить точность теплового проектирования объектов ракетно-космической техники.

Список литературы

1. Биткин В.Е., Денисов А.В., Денисова М.А., Жидкова О.Г., Назаров Е.В., Рогальская О.И., Мелентьев А.В., Мизинова И.А. Апробирование технологического комплекса изготовления силовых и высокоточных размеростабильных элементов конструкций интегрального типа из волокнистых композиционных материалов // Известия Самарского научного

центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 1 (5). С. 1320–1327. EDN: TJEZZR

2. Тайгин В.Б., Лопатин А.В. Обзор конструкций зеркальных антенн космических аппаратов с твердотельными прецизионными размеростабильными рефлекторами // Космические аппараты и технологии. 2021. Т. 5. № 1 (35). С. 14–26. <https://doi.org/10.26732/j.st.2021.1.02> EDN: ZNLFGI

3. Васильев В.В., Барынин В.А., Разин А.Ф., Петроковский С.А., Халиманович В.И. Анизогридные композитные сетчатые конструкции — разработка и приложение в космической технике // Композиты и наноструктуры. 2009. № 3. С. 38–50. EDN: MTZUHB

4. Zhang J., Zhou P., Guan C., Liu TQ, Kang W-H, Feng P, Gao Sh. An ultra-lightweight CFRP beam-string structure // Composite Structures. 2021. Vol. 57. Article no. 113149. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113149>

5. Wang Y., Liu R., Yang H. Design and Deployment Analysis of Modular Deployable Structure for Large Antennas // Journal of Spacecraft and Rockets. 2015. Vol. 52. No. 4. P. 1101–1111. <https://doi.org/10.2514/1.A33127>

6. Sairajan K., Mishra L., Channi A.V. et al. Development of multifunctional structures for spacecraft applications // Advances in Space Research. 2025. Vol. 77. Iss. 2. P. 2389–2410. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.10.103>

7. Baunge M., Ekstrom H., Ingvarson P., Petersson M. A new concept for dual gridded reflectors // Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation, Barcelona, 2010. P. 1–5. ISSN 2164-3342

8. Kang D.-S., Keum D.-H., Choi J.-H., Lee M.-H., Park K., Jung H.-Y., Kang D.-S., Yun J.-H., Lee J.-W., Roh J.-H. Flexible surface reflector antenna for small satellites // Aerospace. 2025. Vol. 12. No. 5. Article no. 414. <https://doi.org/10.3390/aerospace12050414>

9. Резник С.В., Просунцов П.В., Новиков А.Д. Перспективы повышения размерной стабильности и весовой эффективности рефлекторов зеркальных космических антенн из композиционных материалов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 1 (694). С. 71–83. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-1-71-83> EDN: YLVQZY

10. Биткин В.Е., Жидкова О.Г., Денисов А.В., Бородавин А.В., Митюшкина Д.В., Родионов А.В., Нонин А.С. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния размеростабильных композитных элементов конструкций оптических телескопов с помощью метода конечных элементов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». 2016. Т. 20. № 4. С. 707–729. <https://doi.org/10.14498/vsgtu1514>

11. Тестоедов Н.А., Двирный Г.В., Пермяков М.Ю. Определение величины температурной деформации размеростабильных рефлекторов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического универси-

тета имени академика М.Ф. Решетнева. 2011. № 2 (35) С. 67–71. EDN: NXUZIP

12. Резник С.В., Просунцов П.В., Азаров А.В. Обоснование конструктивно-компоновочной схемы рефлектора зеркальной космической антенны с высокой стабильностью формы и малой погонной плотностью // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 3. С. 674–680. EDN: TSXOLT

13. Резник С.В., Просунцов П.В., Азаров А.В. Моделирование температурного и напряженно-деформированного состояний рефлектора зеркальной космической антенны // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 4. С. 945–950. EDN: UARYWL

14. Новиков А.Д., Просунцов П.В., Резник С.В. Определение конструктивного облика рефлектора зеркальной космической антенны из композиционного материала // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18. № 3. С. 308–317. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2017-18-3-308-317> EDN: ZSMGPN

15. Тайгин В.Б., Лопатин А.В. Разработка зеркальной антенны космического аппарата с ультралегким высокоточным размеростабильным рефлектором // Космические аппараты и технологии. 2019. Т. 3. № 3. С. 121–131. <https://doi.org/10.26732/2618-7957-2019-3-121-131>

16. Тайгин В.Б., Лопатин А.В. Метод обеспечения высокой точности формы рефлекторов зеркальных антенн космических аппаратов // Космические аппараты и технологии. 2019. Т. 3. № 4. С. 200–208. <https://doi.org/10.26732/2618-7957-2019-4-200-208> EDN: MTTHSW

17. Резник С.В., Просунцов П.В., Денисов О.В., Петров Н.М., Шуляковский А.В., Денисова Л.В. Расчетно-экспериментальное определение теплопроводности углепластика в плоскости армирования на основе бесконтактного измерения температуры // Тепловые процессы в технике. 2016. Т. 8. № 12. С. 557–563. EDN: XEFEDZ

18. Резник С.В., Просунцов П.В., Денисов О.В., Петров Н.М., Ли В. Расчетно-экспериментальная методика определения теплопроводности композиционного материала корпуса наноспутника // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18. № 3. С. 345–352. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2017-18-3-345-352> EDN: ZSMGRB

19. Reznik S.V., Denisov O.V., Prosuntsov P.V., Denisova L.V., Bondaletov D.N., Petrov N.M. Elaboration of method for studying of thermal conductivity coefficient of anisotropic composites // Complex Systems: Control and Modeling Problems: XXI International Scientific Conference. September, 3–6, Samara, 2019. P. 592–595. <https://doi.org/10.1109/CSCMP45713.2019.8976659>

20. Новиков А.Д., Резник С.В., Денисов О.В. Экспериментальное определение механических и теплофизических характеристик углепластика тонкостенной оболочки антенного рефлектора // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 3 (720). С. 84–91. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-3-84-91> EDN: EINWVE

21. Ван Ц., Денисов О.В., Денисова Л.В. Методика определения коэффициента теплопроводности в окружном направлении полых стержневых элементов композитных космических конструкций // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 2. С. 86–99. EDN: BQPWNW

22. Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. Москва : Машиностроение, 1988. 280 с. URL: <https://djuv.online/file/AxCbSvCpvgR0Q> (дата обращения: 27.08.2025).

23. Колесников А.В., Палешкин А.В., Сыздыков Ш.О. Перспективы применения галогеновых ламп накаливания для моделирования условий внешнего теплообмена космических аппаратов // Тепловые процессы в технике. 2018. Т. 10. № 3–4. С. 158–165. EDN: YNWFQL

24. Abad B., Borca-Tasciuc D.-A., Martin-Gonzalez M.S. Non-contact methods for thermal properties measurement // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 76. P. 1348–1370. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.027> EDN: YXMEEH

25. Худорожко М.В., Просунцов П.В. Метод выбора параметров рабочей зоны установки концентрированного радиационного нагрева // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 12. С. 547–558. EDN: EHTJRK

References

1. Bitkin VE, Denisov AV, Denisova MA, Zhidkova OG, Nazarov EV, Rogalskaya OI, Melentyev AV, Mizinova IA. Approbation of the technological complex of production the power and high-precision size-stable integrated type construction elements from fibrous composite materials. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014;16(1–5): 1320–1327. (In Russ.) EDN: TJEZZR

2. Taygin VB, Lopatin AV. The review of designs of mirror spacecraft antennas with solid high precision size stable reflector. *Spacecrafts and Technologies*. 2021;5(1): 14–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.26732/j.st.2021.1.02> EDN: ZNLFGI

3. Vasil'ev VV, Barynin VA, Razin AF, Petrovskiy SA, Khalimanovich VI. Anisogrid composite lattice structures — development and application in space technology. *Composites and Nanostructures*. 2009;3(3):38–50. (In Russ.) EDN: MTZUHB

4. Zhang J, Zhou P, Guan C, Liu TQ, Kang WH, Feng P, Gao Sh. et al. An ultra-lightweight CFRP beam-

- string structure. *Composite Structures*. 2021;57:113149. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113149>
5. Wang Y, Liu R, Yang H, Cong H, Guo H. Design and Deployment Analysis of Modular Deployable Structure for Large Antennas. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2015;52(4):1101–1111. <https://doi.org/10.2514/1.A33127>
 6. Sairajan KK, Mishra L, Channi AV. et al. Development of multifunctional structures for spacecraft applications. *Advances in Space Research*. 2026;77(2):2389–2410. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.10.103>
 7. Baunge M, Ekstrom H, Ingvarson P, Petersson M. A new concept for dual gridded reflectors. *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation*; 2010 Apr 12; Barcelona. p. 1–5. ISSN 2164-3342
 8. Kang DS, Keum DH, Choi JH, Lee MH, Park K, Jung HY, Kang D-S, Yun J-H, Lee J-W, Roh J-H. Flexible surface reflector antenna for small satellites. *Aerospace*. 2025;12(5):414. <https://doi.org/10.3390/aerospace12050414>
 9. Reznik SV, Prosuntsov PV, Novikov AD. Prospects of increasing the dimensional stability and the weight efficiency of mirror space antenna reflectors made of composite materials. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2018;1(694):71–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-1-71-83> EDN: YLVQZY
 10. Bitkin VE, Zhidkova OG, Denisov AV, Borodavin AV, Mityushkina DV, Rodionov AV, Nonin AS. Mathematical simulation for strain-stress state of optical telescope stable-size composite elements with finite-element method. *Journal of Samara State Technical University, Physical and Mathematical Sciences*. 2016;20(4):707–729. (In Russ.) <https://doi.org/10.14498/vsgtu1514>
 11. Testoedov NA, Dvirnyi GV, Permyakov MYu. Temperature deformation value definition of size stable reflectors. *Vestnik SIBSAU. Aerospace Technologies and Control Systems*. 2011;2(35):67–71. (In Russ.) EDN: NXUZIP
 12. Reznik SV, Prosuntsov PV, Azarov AV. Justification of the structural-layout scheme of a reflector for a mirror space antenna with high shape stability and low areal density. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2015;88(3):674–680. (In Russ.) EDN: TSXOLT
 13. Reznik SV, Prosuntsov PV, Azarov AV. Modeling of temperature and stress-strain states of a reflector for a mirror space antenna. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2015;88(4):945–950. (In Russ.) EDN: UARYWL
 14. Novikov AD, Prosuntsov PV, Reznik SV. Mirror space antenna reflector made of composite materials constructive appearance determination. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2017;18(3):308–317. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2017-18-3-308-317> EDN: ZSMGPN
 15. Taygin VB, Lopatin AV. Design of the Mirror Antenna of a Spacecraft with the Ultralight High Precision Size-Stable Reflector. *Rocket and Space Technology*. 2019;3(29):121–131. (In Russ.) <https://doi.org/10.26732/2618-7957-2019-3-121-131>
 16. Taygin B, Lopatin AV. Method of achievement the high accuracy of the shape of reflectors of mirror antennas of spacecraft. *Spacecrafts and Technologies*. 2019;4(30):200–208. (In Russ.) <https://doi.org/10.26732/2618-7957-2019-4-200-208> EDN: MTTHSW
 17. Reznik SV, Prosuntsov PV, Denisov OV, Petrov NM, Shulyakovskiy AV, Denisova LV. Numerical and experimental estimation of heat conductivity of carbon plastic in a reinforcement plane on the basis of contactless measurement of temperature. *Thermal Processes in Engineering*. 2016;8(12):557–563. (In Russ.) EDN: XEFEDZ
 18. Reznik SV, Prosuntsov PV, Denisov OV, Petrov NM, Lee W. Nanosatellite body composite material thermal conductivity determination computational and theoretical method. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2017;18(3):345–352. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2017-18-3-345-352> EDN: ZSMGRB
 19. Reznik SV, Denisov OV, Prosuntsov PV, Denisova LV, Bondaletov DN, Petrov NM. Elaboration of method for studying of thermal conductivity coefficient of anisotropic composites. *Complex Systems: Control and Modeling Problems: XXI International Scientific Conference*. September, 3–6, Samara, 2019. p. 592–595. <https://doi.org/10.1109/CSCMP45713.2019.8976659>
 20. Novikov AD, Reznik SV, Denisov OV. An experimental study to determine mechanical and thermophysical characteristics of thin-walled carbon plastic antenna reflectors. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 2020;3(720):84–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-3-84-91> EDN: EINWVE
 21. Wang J, Denisov OV, Denisova LV. Thermal conductivity determining technique in the circumferential direction of the space composite structures' hollow rod elements. *Thermal Processes in Engineering*. 2024;16(2):86–99. (In Russ.) EDN: BQPWNW
 22. Alifanov OM. *Inverse heat transfer problems*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1988. (In Russ.) Available from: <https://djvu.online/file/AxCbSvCpvgR0Q> (accessed: 27.08.2025)
 23. Kolesnikov AV, Paleshkin AV, Syzdykov ShO. Prospects for the use of halogen incandescent lamps to simulate conditions of external heat exchange of spacecraft. *Thermal Processes in Engineering*. 2018;10(3–4):158–165. (In Russ.) EDN: YNWFQL
 24. Abad B, Borca-Tasciuc DA, Martin-Gonzalez MS. Non-contact methods for thermal properties measurement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;76:1348–1370. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.027> EDN: YXMEEH
 25. Khudorozhko MV, Prosuntsov PV. Parameters selection method of concentrated radiation heating facility working area. *Thermal Processes in Engineering*. 2024;16(12):547–558. (In Russ.) EDN: EHTJRK

Сведения об авторах

Ефременко Иван Алексеевич, магистрант кафедры СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр.1; ORCID: 0009-0000-6463-932X; e-mail: ivan10052002@yandex.ru

Денисов Олег Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1; eLIBRARY SPIN-код: 6884-6227, ORCID: 0000-0002-7320-0201; e-mail: denisov.sm13@mail.ru

Денисова Лилиана Валентиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1; eLIBRARY SPIN-код: 3508-7617, ORCID: 0000-0003-4748-5351; e-mail: u.pasika@yandex.ru

About the authors

Ivan A. Efremenko, Master's student of the Department SM13 Rocket and Space Composite Structures, Bauman Moscow State Technical University, 5 2-nd Baumanskaya St, Moscow, 105005, Russian Federation; ORCID: 0009-0000-6463-932X; e-mail: ivan10052002@yandex.ru

Oleg V. Denisov, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department SM13 Rocket and Space Composite Structures, Bauman Moscow State Technical University, 5 2-nd Baumanskaya St, Moscow, 105005, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7320-0201, eLIBRARY SPIN-code: 6884-6227; e-mail: denisov.sm13@mail.ru

Liliana V. Denisova, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department SM13 Rocket and Space Composite Structures, Bauman Moscow State Technical University, 5 2-nd Baumanskaya St, Moscow, 105005, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4748-5351, eLIBRARY SPIN-code: 3508-7617; e-mail: u.pasika@yandex.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-2-153-169

EDN: KWNDU

Научная статья / Research article

Оптимальное планирование траектории движения для колесных роботов

А. Саироэль[✉], Х.М. Ал-Аражи^{id}, Ц. Чжан^{id}

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ sairoel@mtu.edu.et

История статьи

Поступила в редакцию: 21 декабря 2025 г.

Доработана: 11 февраля 2026 г.

Принята к публикации: 20 февраля 2026 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта

При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Аннотация. Автоматизация сельскохозяйственных задач с использованием мобильных роботов приобретает все большее значение для точного земледелия. Навигация в сложных, динамичных и неструктурированных средах, таких как поля с неровным рельефом, густой растительностью и препятствиями, например камнями или ирригационными системами, представляет собой серьезную проблему. Следовательно, эффективные алгоритмы планирования траектории и предотвращения столкновений имеют большое значение. Основная цель — внедрение и оценка алгоритма RRT (Rapidly-exploring Random Tree) для скоординированного планирования траектории. Новым вкладом является повышение эффективности планирования и оптимальности траектории по сравнению со стандартным алгоритмом RRT, в частности за счет улучшения генерации оптимальных по времени траекторий и обеспечения надежного предотвращения столкновений в сложных ландшафтах. Система предотвращения столкновений на основе RRT* была оценена с помощью моделирования в MATLAB, проверяя производительность в сценариях с высокой плотностью препятствий, характерных для сельскохозяйственных сред. Моделирование продемонстрировало 94 % успешность планирования траектории и предотвращения столкновений, что указывает на высокий потенциал производительности в сложных сельскохозяйственных ландшафтах. Исследование показало, что RRT* является высокоэффективным решением для планирования траектории в многоколесных сельскохозяйственных роботах, превосходящим стандартный RRT. Он успешно обеспечивает оптимизированные траектории без столкновений в неструктурированных средах, предлагая надежную основу для автономной навигации. 94 %-ный показатель успешности, полученный в ходе моделирования, подтверждает его потенциал и указывает на необходимость дальнейших исследований и полевых испытаний.

Ключевые слова: колесный мобильный робот, группа роботов, алгоритм, предупреждение столкновений, процент успешных попыток

Вклад авторов

Саироэль А. — концептуализация, методология, программное обеспечение, валидация, формальный анализ, подготовка данных, написание и редактирование текста, визуализация, администрирование проекта; Ал-Аражи Х.М. — написание и редактирование текста, визуализация; Чжан Ц. — подготовка данных, написание первоначальной версии, визуализация, валидация, формальный анализ. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования

Саироэль А., Ал-Аражи Х.М., Чжан Ц. Оптимальное планирование траектории движения для колесных роботов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 2. С. 153–169. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-153-169> EDN: KWNDU

© Саироэль А., Ал-Аражи Х.М., Чжан Ц., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Optimal Path Planning for Wheeled Robots

Amertet Sairoel[✉], Hasan M. Al-Arazhi^{ID}, Jingnian Zhang^{ID}

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

✉ sairoel@mtu.edu.et

Article history

Received: December 21, 2025

Revised: February 11, 2026

Accepted: February 20, 2026

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies.

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability

All data obtained during this study are included in the published article.

Abstract. The automation of agricultural tasks using mobile robots is becoming increasingly important for precision farming. Navigation in complex, dynamic, and unstructured environments, such as fields with uneven terrain, dense vegetation, and obstacles such as rocks or irrigation systems, presents a significant challenge. Therefore, efficient path planning and collision avoidance algorithms are of particular significance. The primary objective of this study is to implement and evaluate the RRT* algorithm for coordinated path planning. A novel contribution lies in improving the planning efficiency and path optimality compared to the standard RRT algorithm, particularly through enhanced generation of time-optimal trajectories and robust collision avoidance in complex terrain. The RRT*-based collision avoidance system was evaluated through MATLAB simulations, testing its performance in scenarios with a high obstacle density typical of agricultural environments. The simulation results demonstrated a 94% success rate for trajectory planning and collision avoidance, indicating high performance potential in complex agricultural landscapes. RRT* was shown to be a highly effective trajectory planning solution for multi-wheeled agricultural robots, outperforming standard RRT. It successfully delivers optimized, collision-free trajectories in unstructured environments, offering a robust foundation for autonomous navigation. The 94% success rate obtained in the simulation validates its potential and indicates the need for further research and field testing.

Keywords: wheeled mobile robot, robot group, algorithm, collision avoidance, success rate

Authors' contribution

Sairoel A. — conceptualization, methodology, software, validation, formal analysis, data preparation, text drafting and editing, visualization, project administration; *Al-Arazhi H.M.* — text drafting and editing, visualization; *Zhang J.* — data preparation, initial version drafting, visualization, validation, formal analysis. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Sairoel A, Al-Arazhi HM, Zhang J. Optimal path planning for wheeled robots. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(2):153–169. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-153-169> EDN: KWNDU

Введение

Предотвращение столкновений представляет собой первостепенную задачу в автономной робототехнике, особенно для многоколесных мобильных роботов (ММР), работающих в сложных, динамичных и неструктурированных средах, таких как сельскохозяйственные поля. Эти среды характеризуются наличием многочисленных препятствий, включая статические объекты, такие как деревья, камни и неровный рельеф, а также динамические препятствия, такие как другие роботы, люди и животные [1–6]. Одновременная работа нескольких роботов для

выполнения таких важных задач, как сбор урожая, посадка и мониторинг, значительно увеличивает риск столкновений. Подобные инциденты могут привести к существенному ущербу для урожая, повреждению оборудования и серьезной угрозе безопасности персонала, что подчеркивает критическую необходимость в надежных решениях для навигации многоагентных систем [7–12].

Алгоритм Rapidly-exploring Random Tree Star (RRT*) является признанным и мощным инструментом для оптимального планирования пути и предотвращения столкновений в одноагентных системах. Однако его прямое приме-

нение для скоординированных групп сельскохозяйственных роботов сопряжено со специфическими, нерешенными проблемами. Существует явный пробел в исследованиях, связанный с разработкой усовершенствованных реализаций, которые отвечают уникальным требованиям масштабируемой координации множества агентов в сельскохозяйственных условиях. Эти требования включают эффективное управление столкновениями между агентами, оптимизацию групповой эффективности для повышения производительности и обеспечение надежной работы в реальном времени в непредсказуемых и загроможденных средах. Существует явная необходимость адаптировать RRT* специально для повышения безопасности и операционной производительности совместно работающих роботизированных флотов в сельском хозяйстве [13–18].

Основная цель исследования — реализация и оценка усовершенствованного алгоритма на основе RRT*, разработанного для решения проблемы скоординированного предотвращения столкновений для группы колесных мобильных роботов, выполняющих задачи сбора урожая в сложном сельскохозяйственном ландшафте. Новизна задачи заключается в повышении общей эффективности и безопасности многороботной системы, в частности за счет улучшения оптимальности траекторий и минимизации времени перемещения по сравнению со стандартными алгоритмическими подходами.

Для достижения этой цели была разработана и протестирована система предотвращения столкновений, основанная на алгоритме RRT*. Методология включала два ключевых этапа. Во-первых, в качестве основного планировщика был выбран алгоритм RRT* благодаря его доказанной асимптотической оптимальности, эффективности в исследовании высокоразмерных конфигурационных пространств и врожденной адаптивности к динамическим препятствиям. Во-вторых, производительность системы была тщательно оценена путем комплексного моделирования в среде MATLAB. Этот подход на основе моделирования позволил воссоздать сложные сельскохозяйственные

сценарии, насыщенные множественными статическими и динамическими препятствиями, предоставив проверенный полигон для оценки эффективности алгоритма в генерации безопасных и оптимальных траекторий для каждого робота в составе скоординированной группы.

Тестирование в симуляционной среде дало количественно положительный результат. Реализованная система на основе RRT* успешно планировала пути, свободные от столкновений, и координировала движения роботов в 94 % экспериментальных случаев. Этот высокий процент успеха убедительно демонстрирует значительный потенциал алгоритма для обеспечения эффективной навигации и надежного предотвращения столкновений в смоделированном сложном сельскохозяйственном ландшафте.

Данное исследование приводит к выводу, что алгоритм RRT*, особенно в его усовершенствованной форме, адаптированной для многоагентной координации, является высокоэффективным решением проблемы планирования пути и предотвращения столкновений в сельскохозяйственной робототехнике. Исследование подтверждает, что усовершенствованный RRT* может успешно генерировать оптимизированные, безопасные траектории для команд роботов, работающих в неструктурированных средах, превосходя базовый алгоритм RRT с точки зрения оптимальности пути. Достигнутый в симуляции результат в 94 % успеха подтверждает основную функциональность и надежность предложенного подхода для данной предметной области.

Успешная реализация этой системы на основе RRT* имеет значительный потенциальный эффект. В первую очередь, она повышает безопасность, напрямую снижая риск столкновений как между роботами, так и с препятствиями в окружающей среде, тем самым защищая ценные сельскохозяйственные активы и обеспечивая безопасность работников. Кроме того, она повышает производительность за счет оптимизации индивидуальных траекторий роботов и минимизации времени перемещения благодаря эффективной координации, что улуч-

шает общую пропускную способность автоматизированных задач, таких как сбор урожая. Исследование также способствует развитию области сельскохозяйственной автоматизации, внося вклад в реализуемость полностью автономных, совместно работающих роботизированных флотов, тем самым снижая зависимость от постоянного контроля со стороны человека. Наконец, оно закладывает основу для дальнейшего развития, четко определяя сохраняющиеся проблемы, такие как вычислительная сложность и адаптация в реальном времени. Эта работа согласуется с перспективными направлениями будущих исследований и информирует о них, включая интеграцию методов машинного обучения и разработку более быстрых вариантов алгоритмов, прокладывая, таким образом, путь для интеллектуальных сельскохозяйственных систем следующего поколения.

1. Математическая модель и структура управления многоколесного мобильного робота

1.1. Принцип работы системы предотвращения столкновений многоколесного робота

Алгоритм предотвращения столкновений для многоколесного робота включает в себя обработку данных датчиков, алгоритмы обнаружения препятствий, планирование безопасной траектории и непосредственно навигацию между препятствиями [19–24].

На первом этапе происходит анализ информации о текущем состоянии окружающей среды, получаемой с датчиков робота, на ее основе оценивается достижимость цели. Если в текущих условиях цель достижима, анализ данных с датчиков приостанавливается. Если цель недостижима, запускаются алгоритмы детекции препятствий (рис. 1) [25].

Если препятствие обнаружено, система определяет, является ли оно динамическим или статическим. В зависимости от типа препятствия применяется соответствующий алгоритм предотвращения столкновений [26], после чего система вновь переходит к анализу данных с датчиков.

Описанный алгоритм повторяется непрерывно, обеспечивая роботу способность адаптироваться к изменяющимся условиям и успешно достигать цели [16].

Сбор и анализ данных об окружающей среде с помощью датчиков лежат в основе обнаружения препятствий при автономной навигации роботов. Этот процесс в первую очередь опирается на набор взаимодополняющих методов зондирования. Лидары (LIDAR) обеспечивают точные измерения расстояния до окружающих объектов с помощью лазерных лучей. Ультразвуковые дальномеры работают по принципу эхолокации для определения близости препятствий. Двумерные камеры захватывают визуальные данные для последующих задач обнаружения и классификации объектов, в то время как инфракрасные (ИК) датчики оценивают близость объектов с помощью инфракрасного излучения. Базовый принцип работы заключается в непрерывном сканировании окружения робота этими датчиками. Полученный совокупный поток данных обрабатывается для обнаружения препятствий, определения их точного местоположения и вычисления расстояния до каждого из них.

На основе необработанных данных с датчиков робот строит представление об окружающей его среде. Этот процесс картографирования использует объединенную информацию с нескольких датчиков для создания либо локальной карты, описывающей непосредственную область вокруг агента, либо всеобъемлющей глобальной карты всего известного пространства, когда это возможно. Принцип работы включает постоянную интеграцию и обновление данных датчиков для заполнения карты. В этом представлении препятствия могут обозначаться с использованием различных геометрических примитивов, таких как облака точек, линии или полигоны, что обеспечивает навигационную модель среды.

Алгоритмы планирования пути вычисляют выполнимую траекторию от текущего положения робота к заданной цели, избегая всех нанесенных на карту препятствий.

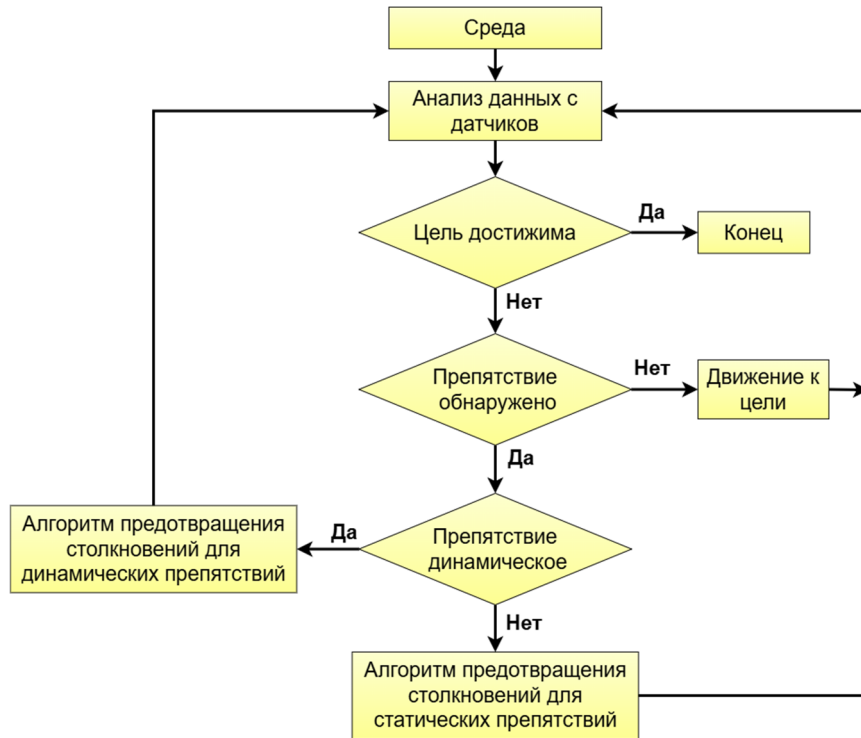


Рис. 1. Алгоритм предотвращения столкновений для колесного мобильного робота

Источники: выполнено А. Саироэль, Х.М. Ал-Аражи, Ц. Чжан.

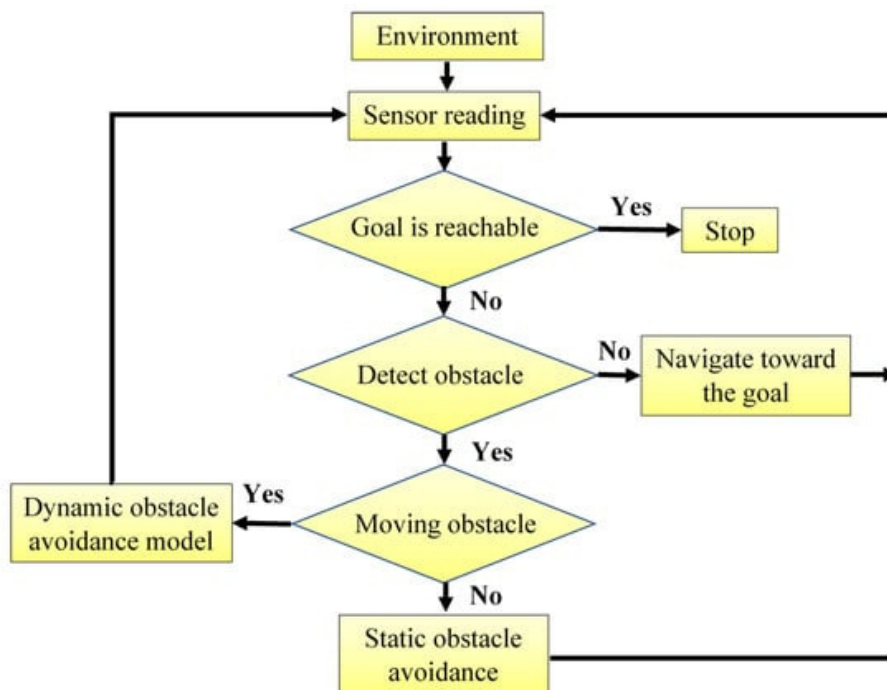


Figure 1. Working mechanism for wheeled mobile robot collision avoidance

Source: by A.F. Sairoel, H.M. Al-Arazhi, Z. Jinnian.

Для решения этой задачи используется несколько известных алгоритмов. Алгоритм A* находит кратчайший путь путем поиска по возможным узлам в среде. Алгоритм Rapidly-exploring Random Tree (RRT) исследует конфигурационное пространство с помощью стохастической выборки для обнаружения жизнеспособного пути. Алгоритм Дейкстры вычисляет кратчайший путь на графовом представлении среды. Основная функция этих планировщиков сгенерировать траекторию, которая минимизирует время в пути или расстояние, соблюдая при этом ограничения на столкновения. Кроме того, эта траектория динамически обновляется в ответ на вновь обнаруженные препятствия.

Алгоритмы предотвращения столкновений обеспечивают реактивное поведение в реальном времени для немедленного реагирования на обнаруженные во время навигации угрозы. В этой области распространены несколько установленных методов. Метод искусственных потенциальных полей моделирует препятствия как источники силы отталкивания, а цель как силу притяжения, направляя робота от столкновений. Динамический оконный подход (Dynamic Window Approach, DWA) учитывает динамику робота, оценивая выполнимые команды скорости в пределах короткого временного окна. Функции управляющих барьеров (Control Barrier Functions, CBF) формально определяют безопасные множества, в пределах которых должен оставаться робот, обеспечивая гарантии предотвращения столкновений. Эти системы работают за счет постоянной корректировки запланированной траектории. При обнаружении препятствия они запускают ответные действия, такие как снижение скорости, полная остановка или изменение направления движения.

Подсистема управления движением выполняет запланированные и реактивные траектории, управляя физическим перемещением робота, что предполагает точную регулировку общих линейной и угловой скоростей робота. Одновременно с этим она преобразует эти высокоуровневые команды в управление каждым колесом в отдельности, регулируя скорость и

направление вращения каждого колеса. Принцип работы заключается в вычислении требуемых линейной (v) и угловой (ω) скоростей для центра системы координат робота для следования по заданному пути. Затем скорости вращения колес модулируются для достижения желаемого движения центра масс, обеспечивая точное отслеживание траектории.

Критически важной особенностью надежной автономной навигации является адаптация в реальном времени на основе непрерывной обратной связи от среды. Система работает по принципу замкнутого цикла, где поступающие данные с датчиков обрабатываются мгновенно. Это позволяет быстро реагировать на непредвиденные изменения в окружающей обстановке. На основе этой обновленной информации робот динамически корректирует свою траекторию, чтобы избежать вновь выявленных препятствий, обеспечивая постоянную и безопасную работу в динамических средах.

1.2. Математическое описание многоколесного мобильного робота

Кинематическая модель многоколесного мобильного робота описывает взаимосвязь между движением робота (скоростью и ориентацией) и силами и моментами, приложенными к его колесам. Ниже приведен пошаговый математический вывод уравнений кинематической модели многоколесного робота. Вводимые ограничения [14]: робот перемещается в двумерном пространстве; Робот имеет n колес, каждое из которых управляется приводом; колеса являются абсолютно твердыми и не проскальзывают; центр масс робота совпадает с его геометрическим центром.

Конфигурация робота. Положение робота описывается вектором

$$q = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ \theta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где (X, Y) — координаты робота в глобальной системе координат; θ — ориентация робота.

Скорость колеса i в системе координат робота описывается вектором

$$v_i = \begin{bmatrix} v_{i,X} \\ v_{i,Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_i \cos(\varnothing_i) \\ v_i \sin(\varnothing_i) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где i — номер колеса; \varnothing_i — угол поворота (если колесо вращается); v_i — скорость вращения колеса. Линейная скорость робота v и его угловая скорость ω связаны со скоростями колес. Для робота с числом колес, равным n , вывод уравнений кинематики выглядит следующим образом. Линейная скорость робота в глобальной системе координат описывается уравнением

$$v = \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos(\theta) \\ v \sin(\theta) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где v — линейная скорость робота. Угловая скорость робота ω описывается уравнением

$$\omega = \dot{\theta}. \quad (4)$$

Движение робота подчиняется введенному выше предположению о том, что проскальзывание в колесах отсутствует. Таким образом, скорость каждого колеса в локальной системе координат робота должна удовлетворять следующему условию:

$$v_i = v + \omega * r_i, \quad (5)$$

где $r_i = [r_{i,X}, r_{i,Y}]^T$ — координаты i -го колеса относительно центра масс робота. Подставив это выражение и выражение (2) в уравнение (5), получим

$$\begin{bmatrix} v_{i,X} \\ v_{i,Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_i \cos(\varnothing_i) \\ v_i \sin(\varnothing_i) \end{bmatrix} + \omega * \begin{bmatrix} -r_{i,Y} \\ r_{i,X} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Объединив описанные выше выражения для линейных и угловых скоростей, получим уравнение кинематической модели робота:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Для робота с числом колес n его линейная и угловая скорости определяются тем, какой вклад в общую скорость вносит каждое из колес:

$$\begin{cases} v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \cos(\varnothing_i) \\ \omega = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{v_i \cos(\varnothing_i)}{r_i} \right) \end{cases}, \quad (8)$$

где r_i — расстояние от i -го колеса до геометрического центра масс робота. Итоговая кинематическая модель описывается уравнением

$$\dot{q} = S(q)u, \quad (9)$$

где $S(q) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ — матрица управления;

$u = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$ — управляющее воздействие.

1.2. Алгоритм RRT* для многоколесного мобильного робота

Основное различие между алгоритмами RRT и RRT* заключается в функции оптимизации алгоритма RRT*, которая перестраивает связи между узлами дерева Γ таким образом, чтобы сократить общее число узлов и повысить эффективность генерируемых траекторий (рис. 2). Алгоритм RRT* включает в себя следующую последовательность действий: начало, инициализация дерева (Γ); задание цели в пространстве поиска; выбор случайной точки в пространстве (X_{rand}) с помощью функции выборки $sample(X)$; поиск ближайшего узла (X_{nearest}), принадлежащего дереву (Γ) и расположенного ближе других к выбранной случайной точке X_{rand} , с помощью функции поиска ближайшего узла $nearest(X_{\text{rand}}, \Gamma)$; добавление нового узла с помощью функции $steer(X_{\text{nearest}}, X_{\text{rand}})$: новый узел (X_{new}) создается путем построения пути от точки, соответствующей узлу X_{nearest} , к точке X_{rand} ; построенный путь должен удовлетворять заданным

ограничениям, в том числе обеспечивать обход препятствий; проверка прямой видимости: алгоритм проверяет, существует ли прямой путь (line of sight) между X_{new} и $X_{nearest}$, и нет ли на этом пути препятствий; оптимизация связей дерева: если такой прямой путь был найден, к дереву Γ применяется функция оптимизации связей $rewire(X_{rand}, \Gamma)$ это позволяет сохранять в дереве наиболее короткие пути; проверка цели: алгоритм вычисляет расстояние

между узлом X_{new} и положением цели (X_{goal}). Если расстояние меньше или равно предварительно заданному пороговому значению (λ), алгоритм возвращает текущее дерево (Γ) в качестве решения; если цель не достигнута, алгоритм повторяется, выбирается новая случайная точка (X_{rand}), поиск продолжается. Таким образом, описанный итеративный процесс позволяет непрерывно обновлять дерево (Γ) и находить оптимальный путь к цели.

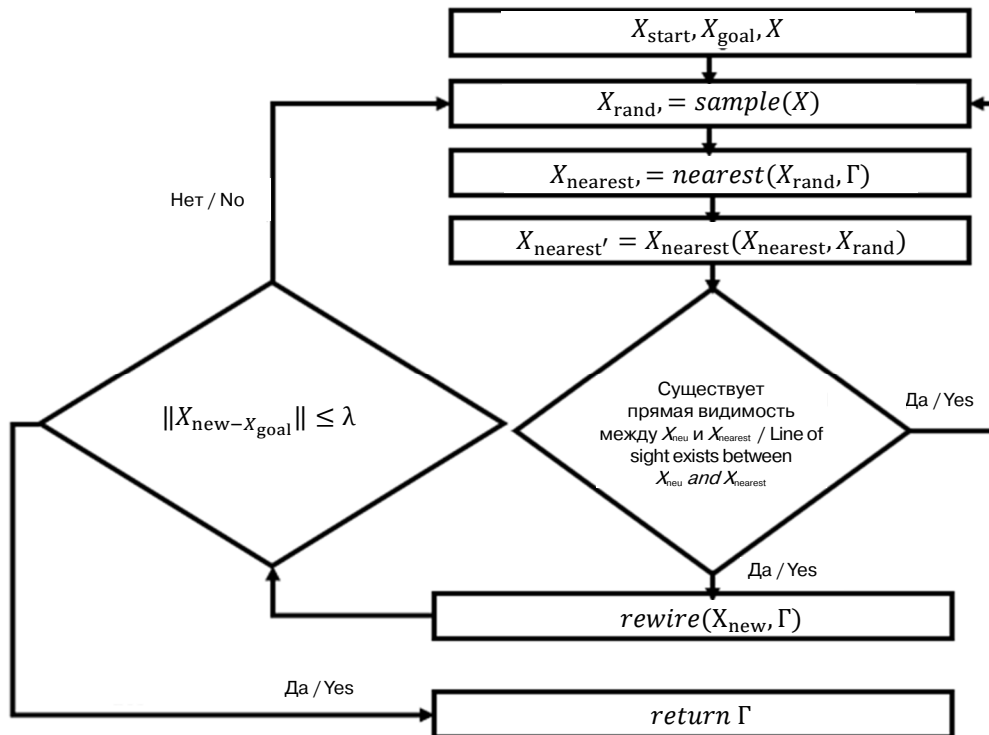


Рис. 2. Схема алгоритма RRT*

Источники: выполнено А. Саироэль, Х.М. Ал-Аражи, Ц. Чжан.

Figure 2. RRT* algorithm diagram

Source: by A.F. Sairoel, H.M. Al-Arazhi, Z. Jinnian.

Именно наличие функции оптимизации связей дерева делает RRT* асимптотически оптимальным алгоритмом. Она обеспечивает постоянное обновление и совершенствование дерева, что, в свою очередь, позволяет строить все более удачные траектории по мере работы алгоритма (рис. 3). В исходном алгоритме RRT этап оптимизации дерева отсутствует, он сосредоточен только на исследовании среды.

Оптимизация структуры дерева в RRT* выполняется следующим образом: после того как был добавлен узел X_{new} , алгоритм выделяет несколько близлежащих узлов ($X_{near} = X_{nearest}(X_{new}, r, \Gamma)$), расположенных в заданном радиусе от X_{new} , выделенные узлы считаются кандидатами на оптимизацию; для каждого из выбранных узлов X_{near} алгоритм проверяет, приведет ли соединение этого узла

X_{near} с узлом X_{new} (вместо текущего родителя) к уменьшению длины пути от корня дерева к X_{near} ; проверка выполняется путем вычисления стоимости пути до X_{near} через текущий родительский узел и сравнения ее со стоимостью пути до X_{near} через X_{new} : $X_{min} = X_{chooseparent}(X_{new}, X_{near})$; если путь через X_{new} оказался короче, алгоритм заменяет связь между X_{near} и текущим родительским узлом на связь с X_{new} . Это позволяет оптимизировать структуру связей дерева и соединить узлы более эффективным образом. Стоимость пути до X_{near} и его дочерних узлов также обновляется с учетом новых связей. Описанный алгоритм повторяется для всех остальных близлежащих узлов-кандидатов. Таким образом, связи дерева полностью обновляются в окрестности X_{new} .

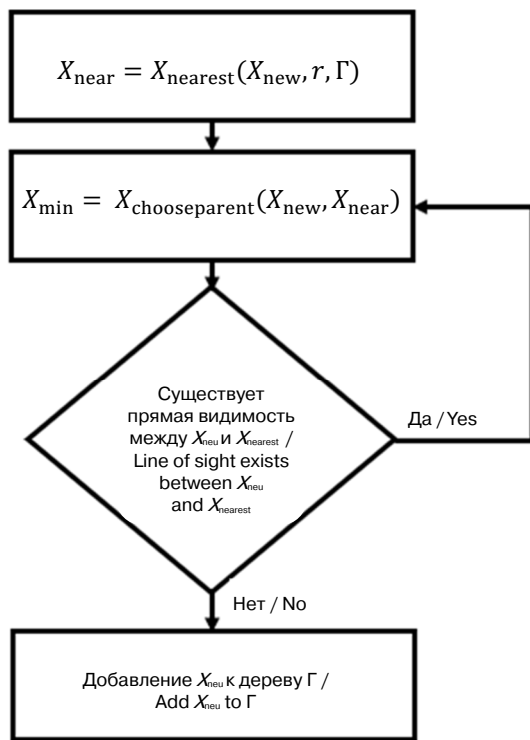


Рис. 3. Алгоритм оптимизации связей дерева в RRT*
Источники: выполнено А. Саирозль, Х.М. Ал-Аражи, Ц. Чжан.

Figure 3. Tree rewiring algorithm in RRT*
Source: by A.F. Sairoel, H.M. Al-Arazhi, Z. Jinnian.

Вероятностная полнота и асимптотическая оптимальность алгоритма основаны на следующих предположениях: конфигурационное про-

странство является связным, следовательно, всегда существует осуществимый путь от точки старта до цели. Выбор точек для исследования: выбор точек выполняется равномерным и случайным образом, это значит, что вероятность исследования роботом является ненулевой для всех точек среды. Система управления: система управления способна сформировать выполнимую траекторию между двумя точками, если такая траектория существует. Функция стоимости: функция стоимости является непрерывной по Липшицу, что означает небольшие изменения в траектории приводят к небольшим изменениям в стоимости пути. Математическая модель многоколесного агробота с RRT* включает в себя модель кинематики, алгоритмы планирования пути и предотвращения столкновений в соответствии с уравнением (7), переписанным в виде

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Алгоритм RRT* позволяет построить траекторию от начальной точки (q_{start}) к цели (q_{goal}) с учетом препятствий. Построение дерева: инициализация дерева T узлом q_{start} ; выбор случайной точки q_{rand} в конфигурационном пространстве; определение ближайшего узла q_{near} в дереве T к узлу q_{rand} ; перемещение из q_{near} в q_{rand} и генерация нового узла q_{new} . Функция стоимости: стоимость пути $c(q)$ вычисляется как суммарное расстояние от q_{start} до q :

$$c(q) = \sum_{i=1}^k \|q_i - q_{i-1}\|, \quad (11)$$

где q_i — начальное расстояние; $q_{i-1} = q_i$ — мгновенное расстояние. Для каждого нового узла q_{new} определяются близлежащие узлы q_{near} , связи с родительскими узлами которых обновляются, если был найден путь с меньшей стоимостью:

$$c(q_{new}) = c(q_{near}) + \|q_{near} - q_{new}\|. \quad (12)$$

Предотвращение столкновений обеспечивается проверкой достижимости каждого нового узла q_{new} путем вычисления функции $CollisionFree(q)$:

$$Collision\ Free\ (q) = \begin{cases} \text{true,} & \text{если } q \text{ принадлежит} \\ & \text{свободному пространству} \\ \text{false,} & \text{иначе} \end{cases}$$

В условиях сельскохозяйственного ландшафта робот должен быть способен объезжать препятствия (посадки культурных растений, камни), минимизируя при этом длину траектории и потребление энергии. Алгоритм RRT* оптимизирует траекторию следующим образом:

$$\min_q (c(q) + \lambda \cdot Energy(q)), \quad (13)$$

где $Energy(q)$ — энергия, затраченная на прохождение траектории; λ — весовой коэффициент, позволяющий поддерживать баланс между длиной траектории и энергоэффективностью. Робот движется по оптимизированной траектории $q_0, q_1, q_2, \dots, q_k$ в соответствии с законом управления (Control law):

$$u = [v, \omega]^T = \text{Control law}(q_{current}, q_{next}), \quad (14)$$

где управляющее воздействие u обеспечивает плавность перехода между узлами. Для оценки системы использовались следующие метрики: $r_{усп}$ — процент успешных тестов, $v_{ср}$ — средняя скорость робота, $t_{ср}$ — среднее время:

$$r_{усп} = \frac{N_{усп}}{N} \cdot 100; \quad (15)$$

$$v_{ср} = \frac{S}{t}; \quad (16)$$

$$t_{ср} = \frac{t}{n_{роб}}; \quad (17)$$

$$\% = \frac{X_{old} - X_{new}}{X_{old}}, \quad (18)$$

где $N_{усп}$ — число успешных тестов; N — общее число тестов, S — общее пройденное расстояние; t — общее время, затраченное на выполнение задачи; $n_{роб}$ — число роботов в группе.

2. Результаты

Автономные системы предотвращения столкновений служат критически важным компонентом для колесных мобильных роботов и автономных машин, обеспечивая безопасное передвижение без необходимости человеческого контроля. Данные системы, включая алгоритмы типа RRT*, используют информацию от датчиков для оценки риска столкновения и построения соответствующей избегающей траектории, как проиллюстрировано на рис. 4. На данной схеме черные точки обозначают возможные путевые точки, серые прямоугольники — разнообразные препятствия (например, людей, животных или технику), красный маркер — целевую позицию, а зеленый маркер — текущее местоположение робота. Фактическая траектория движения отображена черной линией в системе координат, где оси отражают пространственное положение объектов. Геометрия среды задана координатами вершин трех препятствий: первого (20,25), (30,25), (20,30), (30,30); второго (50,55), (65,55), (55,70), (65,70); третьего (70,32), (80,32), (70,52), (80,52). Целевая область имеет диаметр 1 метр, соответствующий габаритам робота. В ходе обучения система достигла 94 % успешных исходов по предотвращению столкновений, подтвердив свою эффективность. Метод демонстрирует потенциал для адаптации к другим автономным агентам в динамических средах, что дополнительно подтверждается симуляционными испытаниями с одним колесным роботом, где в разнообразных сценариях было зафиксировано 80 % успешных попыток.

Координация движения группы роботов представляет собой задачу управления несколькими автономными агентами для достижения общей цели, что позволяет повысить общую продуктивность, эффективность и устойчивость системы, особенно в сложных средах.

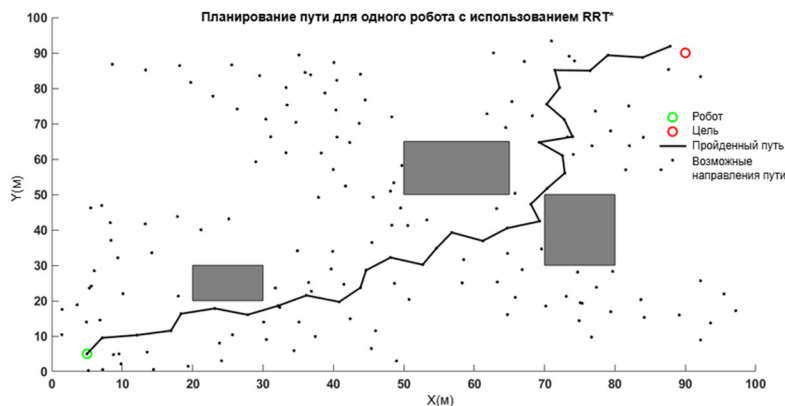


Рис. 4. Планирование пути для одного колесного робота с помощью алгоритма RRT*

И с т о ч н и к: выполнено А. Саирозль, Х.М. Ал-Аражи, Ц. Чжан.

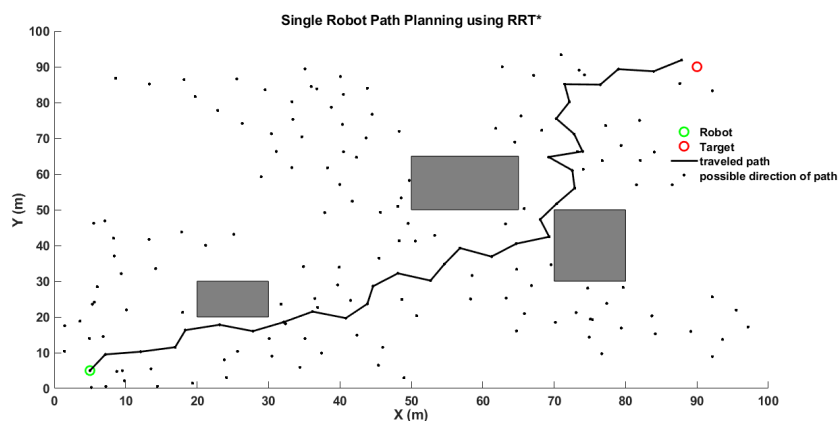


Figure 4. RRT*-Based Path Planning for a Single Wheeled Mobile Robot

S o u r c e: by A.F. Sairoel, H.M. Al-Arazhi, Z. Jinnian.

На рис. 5 визуализирован соответствующий эксперимент: серые прямоугольники обозначают статические и динамические препятствия (такие как люди, животные или техника), красные круглые маркеры — целевые точки, черные круглые маркеры — начальные позиции роботов, а синие линии — их запланированные траектории в заданной системе координат. Тестовая среда включала три препятствия с координатами вершин: (20,25), (30,25), (20,30), (30,30); (50,55), (65,55), (55,70), (65,70); и (70,32), (80,32), (70,52), (80,52). Диаметры целевых зон соответствовали габаритам роботов и составляли 1 м. По результатам эксперимента, первый робот успешно избежал столкновений, тогда как второй и третий роботы

столкнулись с препятствиями. Данный результат может быть объяснен незавершенным этапом обучения алгоритма, что привело к его неоптимальной работе в ходе данной итерации тестирования.

Алгоритм RRT* представляет собой широко применяемый метод планирования движения в робототехнике, предназначенный для построения траекторий, свободных от столкновений, в сложных средах. При использовании в многоагентных робототехнических системах его целью является обеспечение безопасной навигации для каждого агента за счет избегания как статических препятствий, так и столкновений между роботами, что проиллюстрировано на рис. 6.

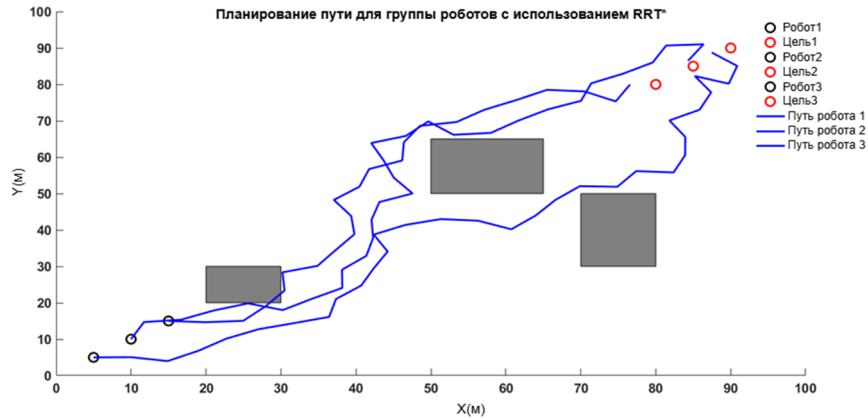


Рис. 5. Планирование пути для группы мобильных роботов с помощью RRT* в процессе обучения алгоритма
Источники: выполнено А. Саироэль, Х.М. Ал-Аражи, Ц. Чжан.

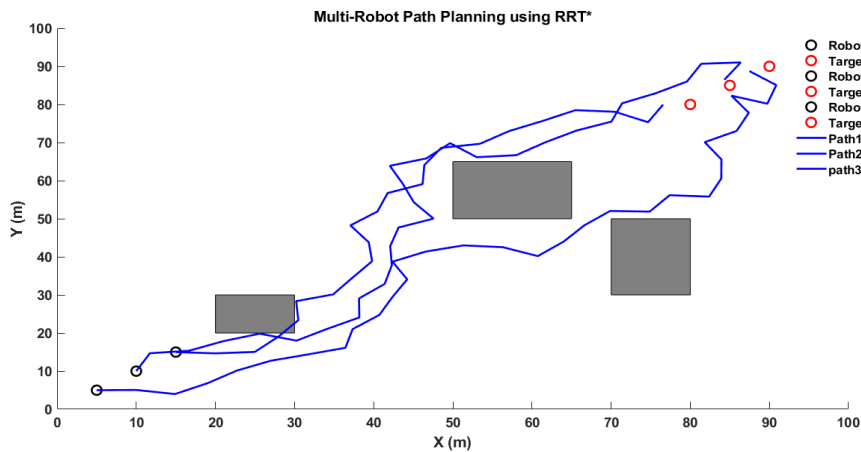


Figure 5. RRT*-Based Multi-Robot Path Planning during Algorithm Training
Source: by A.F. Sairoel, H.M. Al-Arazhi, Z. Jinnian.

Реализация системы предотвращения столкновений для группы роботов на основе RRT* следует структурированному процессу. Первым шагом инициализируется операционная среда: определяются границы рабочего пространства и местоположения препятствий. Координаты вершин препятствий заданы следующим образом: для первого — (20,25), (30,25), (20,30), (30,30); для второго — (50,55), (65,55), (55,70), (65,70); для третьего — (70,32), (80,32), (70,52), (80,52). Каждому роботу назначается начальная позиция и целевая точка. Роботы, диаметр каждого из которых составляет 1 метр, визуальны представлены в виде черных круглых маркеров. Для каждого робота инициализируется независимое RRT*-дерево, корнем

которого является его начальная позиция. Алгоритм итеративно расширяет каждое дерево, выбирая случайные точки в рабочем пространстве и направляя его рост к соответствующей цели с учетом ограничений на столкновения. В процессе расширения каждый новый узел и ребро тщательно проверяются на конфликты с заранее заданными статическими препятствиями, а также с запланированными или текущими позициями других роботов. Для формирования эффективных путей алгоритм использует этап оптимизации путем перестройки связей, который уточняет дерево, обеспечивая асимптотическое приближение к кратчайшей возможной траектории. Эти траектории непрерывно обновляются в ответ на движение других агентов.

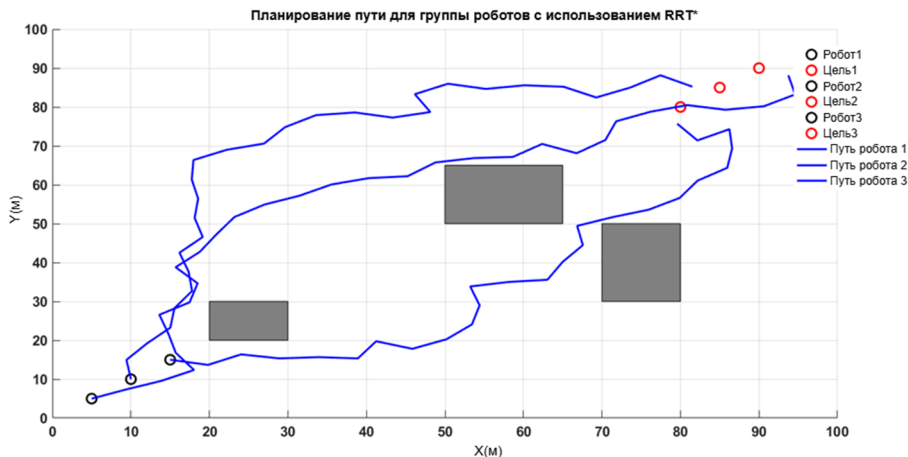


Рис. 6. Успешное планирование пути для группы мобильных роботов после завершения обучения
Источники: выполнено А. Саирозль, Х.М. Ал-Аражи, Ц. Чжан.

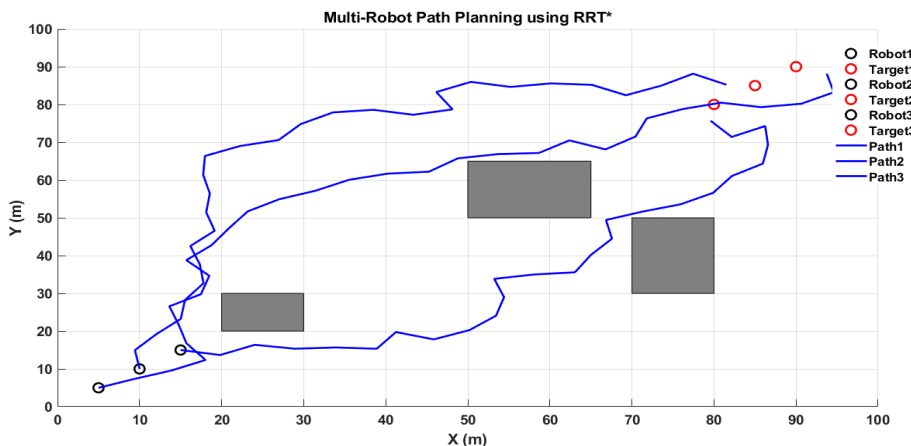


Figure 6. Successful RRT*-Based Path Planning for a Group of Mobile Robots after Training
Source: by A.F. Sairoel, H.M. Al-Arazhi, Z. Jinnian.

Представленный алгоритм предназначен для обеспечения безопасной навигации группы роботов без столкновений, направляя каждого агента по оптимизированной траектории к его цели, что визуализировано на рис. 7. Тестовая среда содержит три многоугольных препятствия, заданных следующими координатами вершин: первое — (20,25), (30,25), (20,30), (30,30); второе — (50,55), (65,55), (55,70); третье — (70,32), (80,32), (70,52), (80,52). На рисунке роботы обозначены черными кружками, целевые точки — красными кружками, препятствия — серым цветом, а возможные пути навигации показаны синими линиями. В данном экспери-

менте используются три робота с заданными начальными и целевыми позициями: робот 1 — от (5,5) до (90,90), робот 2 — от (10,10) до (85,85), робот 3 — от (15,15) до (95,95). Для всех роботов и целей установлен минимальный безопасный интервал или радиус столкновения, равный 1 м. Алгоритм RRT* представляет собой надежную и эффективную основу для предотвращения столкновений в сложных условиях. При интеграции со стратегиями координации нескольких роботов он успешно учитывает динамические препятствия и обеспечивает безопасную и эффективную навигацию всех агентов в загроможденных динамических средах.

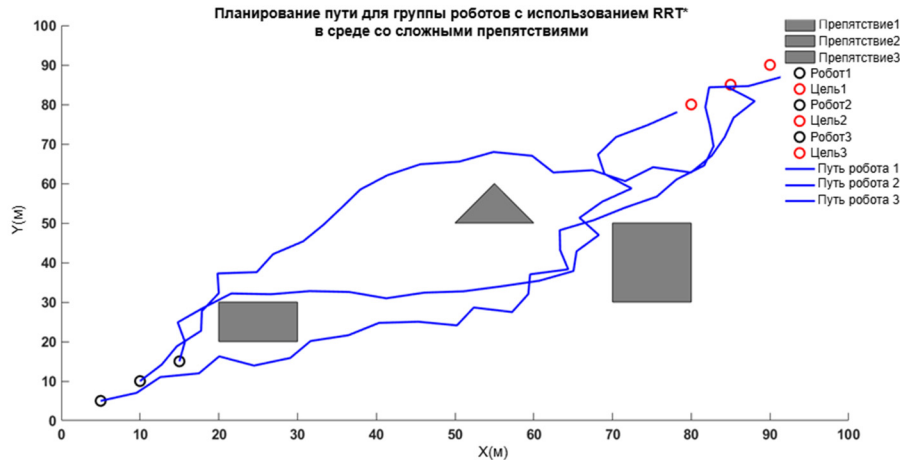


Рис. 7. Планирование пути для группы колесных мобильных роботов со сложными препятствиями
И с т о ч н и к: выполнено А. Саирозель, Х.М. Ал-Аражи, Ц. Чжан.

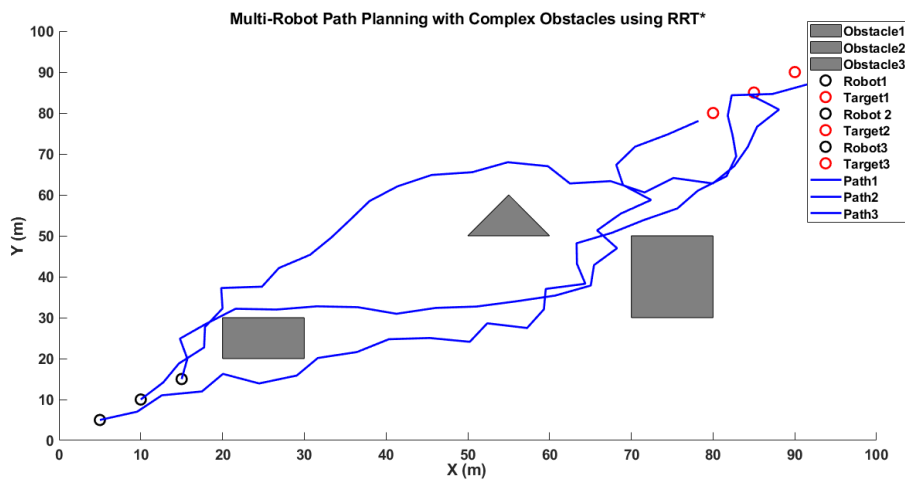


Figure 7. RRT*-Based Path Planning for a Group of Wheeled Mobile Robots in a Complex Obstacle Environment
S o u r c e: by A.F. Sairoel, H.M. Al-Arazhi, Z. Jinnian.

Комплексную оценку системы предотвращения столкновений на основе алгоритма RRT* для группы многоколесных роботов можно провести с использованием ряда ключевых метрик. К ним относятся минимальная дистанция, поддерживаемая между роботами в процессе навигации, время достижения минимальной дистанции между роботом и препятствием, процент успешных тестов, средняя скорость роботов и среднее время достижения цели. Коллективно эти метрики позволяют оценить безопасность, эффективность и адаптивность системы в сложных средах. Высокая минимальная дистанция и большее время до ее достижения ука-

зывают на устойчивость системы предотвращения столкновений, тогда как высокий процент успешных испытаний демонстрирует ее надежность. Оптимальные значения средней скорости и времени выполнения задачи отражают эффективность ее выполнения. В представленном исследовании система показала минимальную дистанцию в 1,5 м между роботом 1 и роботом 2, а также временное окно в 4 с до достижения минимальной дистанции между роботом 2 и препятствием, что обеспечивает достаточное время для корректировки траектории (табл.). Было достигнуто 94 % успешных испытаний, при этом роботы двигались со средней скоростью 1,8 м/с

и достигали своих целей в среднем примерно за 40 с. Кроме того, было отмечено значительное снижение среднеквадратичной ошибки на

80 % по сравнению со стандартным алгоритмом RRT, что подчеркивает повышенную оптимальность траектории реализованного подхода RRT*.

Сравнение метрик предотвращения столкновений

Метрика	RRT	RRT*	Улучшение результата по сравнению с RRT, %
Минимальная дистанция, м	1,2	1,5	25
Время достижения минимальной дистанции, с	1,2	4	70
Процент успешных попыток, %	84	94	12
Средняя скорость роботов, м/с	2	1,8	10
Среднее время достижения цели, с	25	40	60
Среднеквадратичное отклонение, м	0,3	0,06	80

Источники: выполнено А. Саироэль, Х.М. Ал-Аражи, Ц. Чжан.

Comparison of collision prevention metrics

Metric	RRT	RRT*	Improved result compared to RRT, %
Minimum distance, m	1.2	1.5	25
Time to reach the minimum distance, s	1.2	4	70
Percentage of successful attempts, %	84	94	12
The average speed of robots, m/s	2	1.8	10
Average time to reach the goal, s	25	40	60
Standard deviation, m	0.3	0.06	80

Source: by A.F. Sairoel, H.M. Al-Arazhi, Z. Jinnian.

Заключение

Настоящее исследование посвящено разработке и оценке метода предотвращения столкновений для сельскохозяйственных роботов на основе алгоритма RRT*. Работа включает обзор современных подходов в данной области, анализ кинематических уравнений для колесного мобильного робота и детальное описание принципов работы алгоритмов RRT и RRT*.

Алгоритм RRT* представляет собой надежный инструмент для планирования пути в сложных высокоразмерных средах, таких как сельскохозяйственные ландшафты. Его ключевыми преимуществами являются вероятностная полнота, гарантирующая нахождение допустимой траектории при достаточном числе итераций, и асимптотическая оптимальность, обеспечивающая сходимость решения к оптимальному по мере выполнения вычислений. Основное отличие RRT* от базового RRT заключается в функции оптимизации связей дерева, которая постоянно перестраивает его структуру,

заменяя родительские узлы на более оптимальные, что позволяет находить более короткие маршруты к цели.

Экспериментальная часть исследования проводилась в смоделированной среде, содержащей три препятствия с координатами вершин: (20,25), (30,25), (20,30), (30,30); (50,55), (65,55), (55,70), (65,70); и (70,32), (80,32), (70,52), (80,52). Диаметр мобильного робота и целевой зоны был установлен равным 1 м, что создавало дополнительные требования к точности навигации.

В результате обучения система продемонстрировала высокую эффективность, обеспечив предотвращение столкновений в 94 % тестов в групповом сценарии. В экспериментах с одним роботом надежность системы составила 80 % в разнообразных условиях, подтверждая ее адаптивность. Ключевые метрики производительности включали среднюю скорость движения роботов 1,8 м/с и среднее время достижения цели 40 с.

Практическая значимость работы заключается в создании надежной системы предотвращения столкновений для группы колесных роботов, способной функционировать в сложных динамических средах. Решение успешно интегрирует планирование траектории, оптимизацию маршрутов и координацию множества агентов, что делает его перспективным для сельскохозяйственной робототехники и автономных транспортных средств. В качестве направлений будущих исследований выделяются снижение вычислительной сложности алгоритма, обеспечение работы в режиме реального времени, а также интеграция методов машинного обучения и систем человеко-роботного взаимодействия для дальнейшего повышения эффективности и автономности системы.

References / Список литературы

- Gammell JD, Srinivasa SS, Barfoot TD. Informed RRT*: Optimal sampling-based path planning focused via direct sampling of an admissible ellipsoidal heuristic. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; 2014 14–18 Sep; Chicago, IL, USA. IEEE; 2014. p. 2997–3004. Available from: http://asrl.utias.utoronto.ca/~jdg/sbib/gammell_iros14.pdf (accessed: 25.09.2025) <https://doi.org/10.1109/IROS.2014.6942976>
- Ichler B, Harrison J, Pavone M. Learning sampling distributions for robot motion planning. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2018. p. 7087–7094. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460730>
- Karaman S, Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning with deterministic μ -calculus specifications. *American Control Conference (ACC)*. 2012. p. 735–742. <https://doi.org/10.1109/ACC.2012.6315419>
- Alonso-Mora J, Naegeli T, Siegwart R, Beardsley P. Collision avoidance for aerial vehicles in multi-agent scenarios. *Autonomous Robots*. 2015;39(1):101–121. <https://doi.org/10.1007/s10514-015-9429-0> EDN: PHUHWE
- Karaman S, Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning. *International Journal of Robotics Research*. 2011;30(7):846–894. <https://doi.org/10.1177/0278364911406761>
- Islam F, Nasir J, Malik U, Ayaz Y, Hasan O. RRT*-SMART: Rapid Convergence Implementation of RRT* Towards Optimal Solution. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. Chengdu, China; 2012. p. 1651–1656. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2012.6284384>
- Noreen I, Khan A, Habib Z. A Comparison of RRT, RRT* and RRT*-smart path planning algorithms. *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)*. 2016;16(10):20–27. Available from: http://paper.ijcsns.org/07_book/201610/20161004.pdf (accessed: 25.07.2025)
- Karaman S, Walter MR, Perez A, Frazzoli E, Teller S. Anytime motion planning using the RRT. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Shanghai, China; 2011. p. 1478–1483. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980479>
- Noreen I, Khan A, Habib Z. Optimal path planning using RRT* based approaches: a survey and future directions. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2016;7(11):97–10. <http://doi.org/10.14569/IJACSA.2016.071114>
- Cao M, Mao H, Tang X, Sun Y, Chen T. A Novel RRT*-connect algorithm for path planning on robotic arm collision avoidance. *Scientific Reports*. 2025;15(1):2836. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87113-5> EDN: GORSYD
- Bialkowski J, Karaman S, Frazzoli E. Massively Parallelizing the RRT and the RRT. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Francisco, CA, USA; 2011. p. 1561–1566. <https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6095053>
- Kuffner JJ, LaValle SM. RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning. *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No. 00CH37065)*. San Francisco, CA, USA, 2000;2:995–1001. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2000.844730>
- Vaara ST, Reinikainen M, Wald R, Bagshaw SM, Pettilä V. Timing of RRT Based on the Presence of Conventional Indications. *Clinical Journal of the American Society of Nephrology*. 2014;9(9):1577–1585. <https://doi.org/10.2215/CJN.12691213>
- Kuwata Y, Fiore GA, Teo J, Frazzoli E, How JP. Motion planning for urban driving using RRT. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Nice, France; 2008. p. 1681–1686. <https://doi.org/10.1109/IROS.2008.4651075>
- Moon C, Chung W. Kinodynamic planner dual-tree RRT (DT-RRT) for two-wheeled mobile robots using the rapidly exploring random tree. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014;62(2):1080–1090. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2345351>
- Hassan IA, Abed IA, Al-Hussaibi WA. Path planning and trajectory tracking control for two-wheel mobile robot. *Journal of Robotic Control*. 2024;5(1):1–15. <https://doi.org/10.18196/jrc.v5i1.20489> EDN: DJGXY
- Massoud MM, Abdellatif A, Atia MR. Different path planning techniques for an indoor omni-wheeled mobile robot: Experimental Implementation, Comparison and Optimization. *Applied Sciences*. 2022;12(24):12951. <https://doi.org/10.3390/app122412951> EDN: KDGZOL
- Sudhakara P, Ganapathy V, Sundaran K. Optimal trajectory planning based on bidirectional spline-RRT* for

wheeled mobile robot. *Third International Conference on Sensing, Signal Processing and Security (ICSSS)*. Chennai, India; 2017. p. 65–68. <https://doi.org/10.1109/SSPS.2017.8071566>

19. Rasheed AAA, Al-Araji AS, Abdullah MN. Static and Dynamic Path Planning Algorithms Design for a Wheeled Mobile Robot Based on a Hybrid Technique. *International Journal of Intelligent Engineering Systems*. 2022;15(4):167–181. <https://doi.org/10.22266/ijies2022.0831.16> EDN: AWSUUK

20. Yin X, An G, Zhong Z, Yang S, Yang L, Du J, Jin C. An automatic steering system for agricultural wheeled vehicles using fuzzy control. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024;217:108544. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4542901> EDN: GEKAHS

21. Hu B, Cao Z, Zhou M. An Efficient RRT-Based Framework for Planning Short and Smooth Wheeled Robot Motion Under Kinodynamic Constraints. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020;68(4):3292–3302. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2978701> EDN: DWILJD

22. Borkar KK, Aljrees T, Pandey SK, Kumar A, Singh MK, Sinha A, Singh KU, Sharma V. Stability analysis

and navigational techniques of wheeled mobile robot: A review. *Processes*. 2023;11(12):3302. <https://doi.org/10.3390/pr11123302> EDN: BTXNFI

23. Yin X, Dong W, Wang X, Yu Y, Yao D. Route planning of mobile robot based on improved RRT star and TEB algorithm. *Scientific Reports*. 2024;14(1):8942. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59413-9> EDN: SRNNEV

24. Naderi K, Rajamäki J, Hämäläinen P. RT-RRT*: a real-time path planning algorithm based on RRT*. *ACM SIGGRAPH Conference on Motion in Games*. 2015. p. 113–118. <https://doi.org/10.1145/2822013.2822036>

25. Jayasree KR, Jayasree PR, Vivek A. Dynamic Target Tracking Using a Four Wheeled Mobile Robot with Optimal Path Planning Technique. *International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*. Kollam, India, 2017. p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICCPCT.2017.8074365>

26. Chen L, Shan Y, Tian W, Li B, Cao D. A fast and efficient double-tree RRT*-like sampling-based planner applying on mobile robotic systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2018;23(6):2568–2578. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2018.2821767>

Сведения об авторах

Саирозль Амертет Финекомесс, аспирант кафедры высшей школы автоматизации и робототехники, институт машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация, 195220, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б; ORCID: 0000-0002-8187-0221; e-mail: sairoel@mtu.edu.et

Ал-Аражи Хасан Мохаммед, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей школы автоматизации и робототехники, институт машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация, 195220, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б; ORCID: 0000-0001-6900-7946; e-mail: hassana@mail.ru

Чжан Цзиньянь, аспирант кафедры высшей школы автоматизации и робототехники, институт машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация, 195220, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б; ORCID: 0009-0005-0954-7015; e-mail: niange6666@gmail.com

About the authors

Amertet Finecomess Sairoel, PhD student of the Department of Higher School of Automation and Robotics, Institute of Mechanical Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29B Politekhnikeskaya St, St. Petersburg, 195220, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8187-0221; e-mail: sairoel@mtu.edu.et

Hasan M. Al-Arazhi, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Higher School of Automation and Robotics, Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29B Politekhnikeskaya St, St. Petersburg, 195220, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6900-7946; e-mail: hassana@mail.ru

Jingnian Zhang, PhD student of the Department of Higher School of Automation and Robotics, Institute of Mechanical Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29B Politekhnikeskaya St, St. Petersburg, 195220, Russian Federation; ORCID: 0009-0005-0954-7015; e-mail: niange6666@gmail.com



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-2-170-181

EDN: KWZCUV

Research article / Научная статья

Development of a Technological Process for Producing and Investigation of Cermet Electrodes Based on TiC–NiCrAl and TiC–NiCrAlY

Ivan A. Nazarko^{a,b}, Andrey P. Chizhikov^b, Mikhail S. Antipov^b, Pavel M. Bazhin^{a,b}

^aRUDN University, Moscow, Russian Federation

^bMerzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russian Federation

✉ nazarkovanya@yandex.ru

Article history

Received: November 29, 2025

Revised: January 21, 2026

Accepted: February 5, 2026

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies.

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability

All data obtained during this study are included in the published article.

Abstract. This study presents a developed technological process for producing cermet electrodes based on TiC–NiCrAl and TiC–NiCrAlY using self-propagating high-temperature synthesis followed by deformation (free SHS compression), intended for applying coatings via electro spark alloying (ESA). The relevance of the study is determined by the need to create new electrodes with improved physical and mechanical characteristics to enhance the wear resistance and service life of machine components while reducing the cost and energy intensity of protective coating application processes. It is shown that ESA is a promising surface hardening method, the efficiency of which is largely determined by the properties of the electrode materials used. A comprehensive technological scheme is proposed, including the preparation of powder preforms, synthesis and production of compact materials by free SHS compression, and evaluation of their mechanical and structural characteristics. The phase composition was studied using X-ray diffraction (XRD), and the structural features were examined by scanning electron microscopy (SEM). The regularities of the influence of the component composition and parameters of free SHS compression on the structure formation and operational properties of the cermet electrodes have been established. It is shown that the developed approach ensures the production of electrodes with an improved combination of properties, promising for application in ESA technology to enhance the wear resistance and reliability of machine components.

Keywords: electro spark alloying, electrode, cermet composite, self-propagating high-temperature synthesis, SHS compression, titanium carbide

Authors' contribution

Nazarko I.A. — conducting research, writing, preparing an article for publication, methodology, formal analysis; Chizhikov A.P. — conducting research, methodology; Antipov M.S. — conducting research, methodology; Bazhin P.M. — developing a research concept, scientific guidance, writing, formal analysis. All the authors have read the final version of the article and approved it.

Funding

The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the ISMAN state assignment, scientific topic code No. CITIS — 125021201986-5.

For citation

Nazarko IA, Chizhikov AP, Antipov MS, Bazhin PM. Development of a technological process for producing and investigation of cermet electrodes based on TiC–NiCrAl and TiC–NiCrAlY. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(2):170–181. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-170-181> EDN: KWZCUV

© Nazarko I.A., Chizhikov A.P., Antipov M.S., Bazhin P.M., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Разработка технологического процесса получения и исследование металлокерамических электродов на основе TiC–NiCrAl и TiC–NiCrAlY

И.А. Назарько^{a,b}, А.П. Чижиков^b, М.С. Антипов^b, П.М. Бажин^{a,b}

^a Российский университет дружбы народов имени, Москва, Российская Федерация

^b Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук, Черноголовка, Российская Федерация
✉ nazarkovanya@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 29 ноября 2025 г.

Доработана: 21 января 2026 г.

Принята к публикации: 5 февраля 2026 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта

При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Аннотация. Представлен разработанный технологический процесс получения металлокерамических электродов на основе TiC–NiCrAl и TiC–NiCrAlY методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза с последующим деформированием (свободное СВС-сжатие), предназначенных для нанесения покрытий методом электроискрового легирования (ЭИЛ). Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания новых электродов с улучшенными физико-механическими характеристиками для повышения износостойкости и долговечности машиностроительных деталей при одновременном снижении стоимости и энергоёмкости процессов нанесения защитных покрытий. Показано, что ЭИЛ является перспективным методом упрочнения поверхностей, эффективность которого в значительной степени определяется свойствами применяемых электродных материалов. Предложена комплексная технологическая схема, включающая приготовление порошковых заготовок, синтез и получение компактных материалов методом свободного СВС-сжатия и оценку их механических и структурных характеристик. Фазовый состав изучен методом рентгеноструктурного анализа (РФА), а особенности строения — методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Установлены закономерности влияния состава и параметров свободного СВС-сжатия на формирование структуры и эксплуатационные свойства полученных металлокерамических электродов. Показано, что разработанный подход обеспечивает получение электродов с улучшенным комплексом свойств, перспективных для применения в технологии ЭИЛ с целью повышения износостойкости и надежности деталей машиностроения.

Ключевые слова: электроискровое легирование, электрод, металлокерамический композит, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, СВС-сжатие, карбид титана

Вклад авторов

Назарько И.А. — проведение исследований, написание текста, подготовка статьи к публикации, методология, формальный анализ; Чижиков А.П. — проведение исследований, методология; Антипов М.С. — проведение исследований, методология; Бажин П.М. — разработка концепции исследования, научное руководство, написание текста, формальный анализ. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Финансирование

Работа подготовлена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания ИСМАН, код (шифр) научной темы № ЦИТИС — 125021201986-5.

Для цитирования

Назарько И.А., Чижиков А.П., Антипов М.С., Бажин П.М. Разработка технологического процесса получения и исследование металлокерамических электродов на основе TiC–NiCrAl и TiC–NiCrAlY // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 2. С. 170–181. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-170-181> EDN: KWZCUV

Introduction

The application of protective coatings is one of the key areas of modern mechanical engineering technology, since it is the surface layer that, in most cases, determines the wear resistance, strength, corrosion resistance, and overall service life of machine parts and tools [1–4]. Under conditions of intensified operating conditions, increased loads, and stricter reliability requirements, the need for materials capable of maintaining functional properties under the simultaneous influence of mechanical wear, aggressive environments, and elevated temperatures is growing [5–7]. In this regard, the development of new technological approaches to surface modification and the creation of effective protective coatings is a pressing scientific and technical challenge [8; 9].

At present methods such as flame and plasma spraying, electric arc [1; 10] and laser technologies [11], ion-plasma deposition and their various modifications [12] are widely used for applying protective coatings. However, these methods are generally characterized by high equipment costs, significant energy costs, limited mobility and significant thermal impact on the material, which can lead to structural changes and deterioration of the mechanical properties of the base onto which the protective coating is applied [7; 13; 14].

Electric spark alloying (ESA) is considered a promising alternative with a number of significant advantages: localized processing, minimal thermal impact, no need for a vacuum or protective atmospheres, the ability to harden hard-to-reach areas, mobility, and the relatively low cost of the equipment used [1; 15–17]. However, the effectiveness of ESA is crucially determined by the properties of the electrode material, which determine the intensity of mass transfer, the structure of the formed layer, the performance characteristics of the coating and consequently the service life of the part or tool.

The most common electrode materials for ESA are alloys based on tungsten and titanium carbides with a metallic binder (WC–Co, WC–TiC–Co, etc.) [3; 7; 18]. Despite the relatively high

hardness and wear resistance of such materials, they have a number of disadvantages, including the high cost of raw materials, limited corrosion resistance, a tendency to brittle fracture, and insufficient adaptability to changes in alloying conditions. This indicates the existence of a scientific and technological gap associated with the absence of a universal methodology for the targeted design of electrode materials for ESA with an optimal set of properties [19–20].

A promising approach to solving this problem is the use of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) [21–22] followed by compression (SHS compression), which allows the production of dense cermet materials with a given phase composition and controlled structure [10; 23–24]. The SHS compression method is characterized by high energy efficiency, technological flexibility, and the ability to vary the component composition over a wide range, which makes it attractive for the development of next-generation electrode materials [25].

The object of study in this research is cermet composites based on the TiC–NiCr system with additional alloying with aluminum and yttrium, intended for use as electrodes for ESA. The central scientific problem is the lack of a comprehensive, experimentally proven technological scheme covering all stages of electrode material creation — from the selection of component composition and SHS compression parameters to the assessment of the physical, mechanical, electrical and structural characteristics of the final product.

The objective of the research is to develop a process for producing and characterizing TiC–NiCrAl and TiC–NiCrAlY-based cermet electrodes using the free SHS compression method for ESA. To achieve this goal, the following tasks were addressed: developing a process method for producing the electrodes; studying their mechanical properties; analyzing their phase composition using X-ray diffraction analysis; and studying their microstructure using SEM to establish composition — structure — property relationships.

The academic novelty of this study lies in its integrated approach to the design and production

of ESA electrodes, implementing a comprehensive process chain from synthesis to functional evaluation. The practical significance of this study lies in the possibility of targeted development of competitive ESA electrodes that enhance wear resistance and extend the life of mechanical engineering components.

1. Materials and methods

Commercial powders of titanium, carbon black (soot), and nickel-chromium alloy (NiCr) with added aluminum and yttrium were used as starting components (Table 1). The Al additive

serves as an additional exothermic agent and structure modifier, while Y is an effective element that improves the boundary structure of carbide grains and the thermal stability of the composite. The component composition and mass ratio of the powders are presented in Table 2.

Preliminary preparation of components (step 2). To eliminate the influence of adsorbed moisture on dosing accuracy and combustion stability, all powders were subjected to isothermal aging in a SNOL-3.5 drying oven at a temperature of 50 ± 2 °C for 24 hours. This mode was chosen to minimize the risk of surface oxidation of the powders, which can occur at high temperatures.

Table 1. Powder Characteristics

Powder	Powder Brand/Grade	Reagent Purity, %	Particle Size, μm
Ti	PTS-1	99,0	45
C	P-803	99,1	1
NiCr	PR-12Kh18N10T	97,0	45
NiCrAl	METCO-451	97,0	56
NiCrAlY	AMDRY-962	97,0	53

Source: by I.A. Nazarko.

Table 2. Mass Ratio of Powder Components

№	Designation	Content of Initial Reagents, wt., %				
		Ti	C	NiCr	NiCrAl	NiCrAlY
1	TiC–NiCr	56	14	30	–	–
2	TiC–NiCrAl	56	14	–	30	–
3	TiC–NiCrAlY	56	14	–	–	30

Source: by I.A. Nazarko.

Batch preparation procedure (step 3). The calculated mass of each component was weighed on a CAS MWP-1500 laboratory balance with an accuracy of 0.1%. Mechanical mixing was carried out in a ball mill for 4 hours. Grinding media were cylinders made of 12Kh18N10T steel with a mass-to-mass ratio of 3.5:1. After mixing and sifting through a 2.5 mm sieve to remove grinding media, the mixture is returned to the drying oven for 2 or more hours to remove excess moisture introduced during mixing.

Procedure for producing powder blanks (step 4). The batch blanks (presses) were produced

using cold uniaxial pressing on a Hercules-40 hydraulic press. To study the combustion temperature and rate, 25 mm diameter blanks were prepared. Pressure was varied to produce blanks with a relative density in the range of 50–75% of the theoretical value. To obtain compacts, batch blanks with dimensions of 60×90×12 mm were prepared, achieving the optimal relative density. The formed blanks were visually inspected for cracks and delamination.

Methodology for Determining Temperature and Combustion Rate (Step 4.1). The temperature and combustion rate were determined using the following method. Two VR5/VR20 tungsten-

rhodium thermocouples, mounted vertically and 10 mm apart, were placed in a charge blank (weight 35 g, diameter 25 mm). Their signals were recorded using a QMBOX1-40-50 ADC. The passage of the combustion front through each thermocouple was recorded as a change in temperature. The combustion rate was calculated as the ratio of the distance between the thermocouples to the time interval between these events.

XRD and SEM methods (Step 7.1). To determine the phase composition of the synthesized materials, X-ray diffraction analysis was performed on a DRON-3 diffractometer. Qualitative identification of the phases was performed based on the position of diffraction peaks in the obtained X-ray diffraction patterns, and their relative content was estimated based on the intensity of the reflections. The microstructure of the samples was examined using a LEO 1450 scanning electron microscope.

Measurement of mechanical properties (Step 7.2). The mechanical properties of the

obtained samples were determined using a NanoScan-4D dynamic nanohardness tester: hardness (H), elastic modulus (E), elastic recovery (η), and plastic and elastic deformation work. Indentation was performed in accordance with ISO 14577-1:2002 on polished cross-sections of the samples in the central part under a load of 0.5 N using a Berkovich diamond tip. The loading time was 10 s, the hold time under load was 2 s; the distance between indentations was not less than: $x = 15 \mu\text{m}$ and $y = 12 \mu\text{m}$.

2. Results

This work involved the development and optimization of a process for producing TiC–NiCr electrodes alloyed with aluminum and yttrium. A general diagram of the developed and optimized multi-stage process, reflecting the sequence of operations and feedback loops for adjusting parameters, is presented in Figure 1.

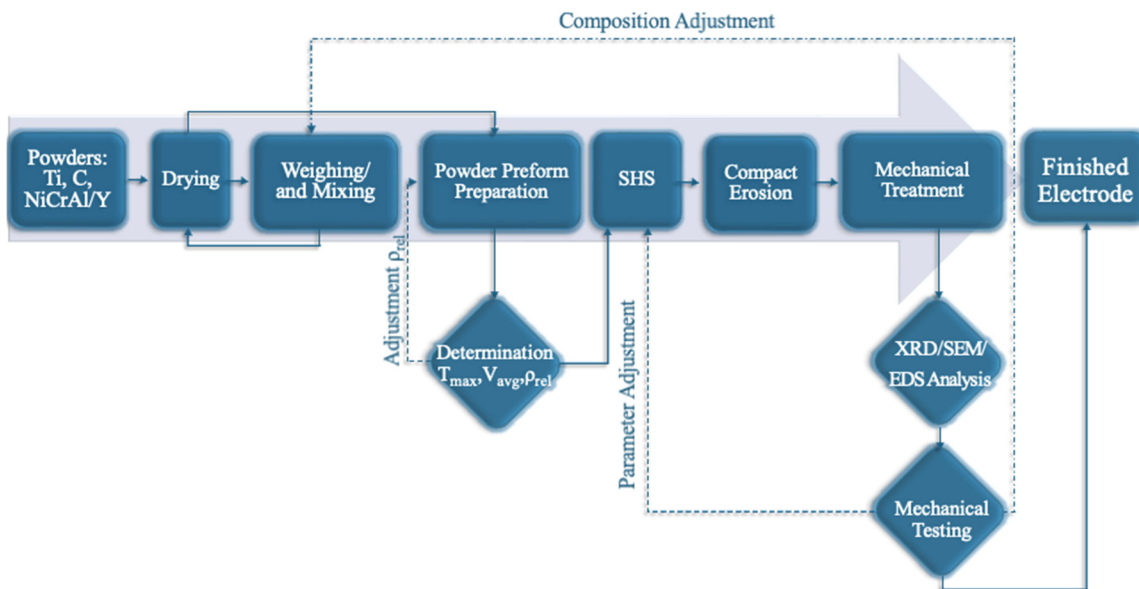


Figure 1. Flowchart of the electrode production process by SHS compression

Source: by I.A. Nazarko.

During the initial stages of the technological process (stages 1–3 in Figure 1), the initial powder reagents are prepared and processed in accordance with their mass ratios given in Table 2. The powder

mixture is used to prepare blanks of specified shapes and sizes for combustion characterization and compact production under free SHS compression conditions. The critical factor determining

the suitability of the synthesized material for plastic deformation after the combustion wave has passed is the temperature and time conditions of its production, which directly depend on the combustion parameters of the charge blank. These parameters are significantly influenced by the relative density of the charge blank, which is preliminarily selected experimentally prior to the SHS compression process.

To select the optimal density, combustion characterization studies were conducted in this work (stage 4.1). In this work, we experimentally investigated workpieces based on the TiC–NiCrAl (relative density 0.68–0.76) and TiC–NiCrAlY

(0.69–0.77) systems. For each composition, the maximum temperature (T_{max}) and combustion rate (V) were determined based on the obtained experimental thermograms. Summary graphs of the dependences of these parameters on relative density are shown in Figure 2.

After selecting the optimal parameters for the blank, compacts are produced using free SHS compression (Stage 5). A blank (Figure 3) with optimal density is initiated at the end by a tungsten coil to initiate combustion. When the combustion front has traversed the entire volume, but the product is still in a high-temperature plastic state, pressure is applied to it by the press plunger.

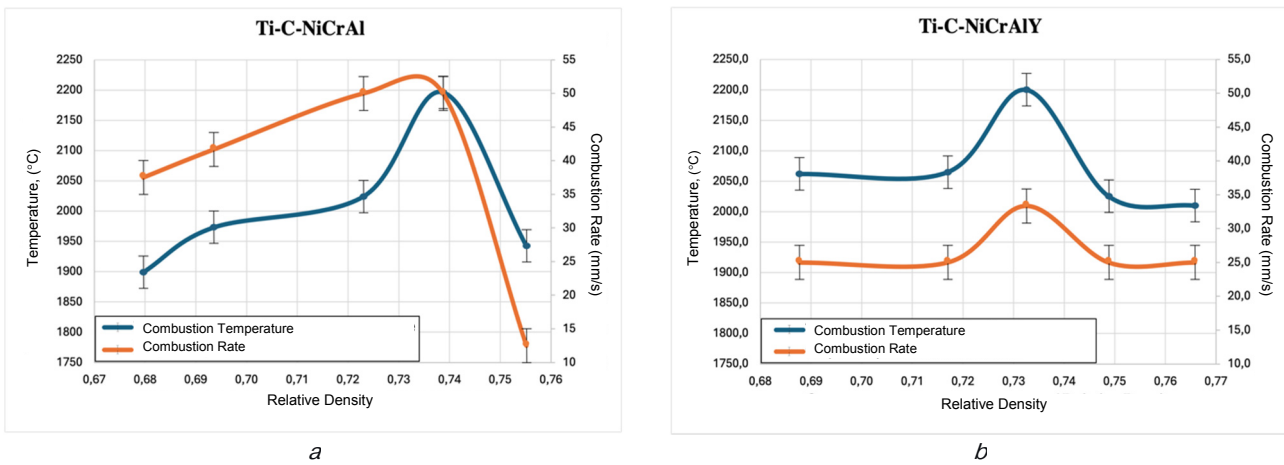


Figure 2. Combustion temperature and velocity as functions of the relative density of the billet for the following compositions: *a* – TiC–NiCrAl; *b* – TiC–NiCrAlY
Source: by I.A. Nazarko.

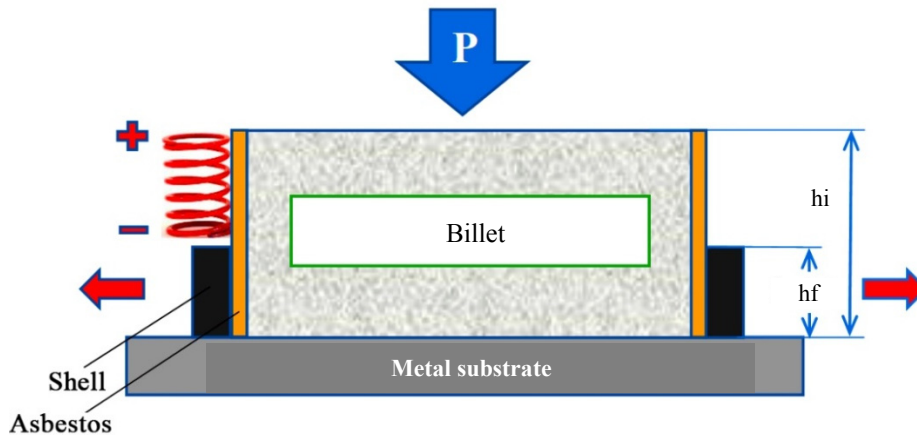


Figure 3. Schematic of the powder billet before free SHS compression
Source: by P.M. Bazhin.

The key optimized parameters are the magnitude of the applied pressure and the delay time between the combustion wave's passage through the entire sample and the onset of compression. Correct selection of these parameters eliminates macropores and achieves high density. Immediately after pressing, to relieve thermal stress, the sample is subjected to low-temperature treatment at 500°C, followed by slow cooling (~12 hours). After the furnace has cooled, the resulting compacts are subjected to rough machining (Stage 6) on a plane-parallel grinding machine to remove surface defects. In order to obtain the required dimensions, the resulting compact is subjected to electrical discharge cutting at the next stage.

The resulting samples were then subjected to a comprehensive analysis to evaluate their structure and properties. This study included structural phase analysis, and SEM analysis was used to study the structure, determine the distribution and sizes of the main phases and alloying elements (Al, Y).

The mechanical properties of the obtained materials were also tested. Key parameters include microhardness, elastic modulus, and others. This stage is crucial for the entire optimization cycle. If the results do not meet the target indicators, the process returns to the previous stages, as shown in the flowchart (see Figure 1) by the dotted arrows. Adjustments can be made in two directions: first, by changing the synthesis modes (pressure and delay time) or by returning to the initial adjustment of the initial powder mixture composition, including changing the percentage ratio of the main components and the amount of alloying additives. Thus, the cycle of synthesis, processing, and analysis is repeated until the optimal combination of properties is achieved. After confirming the optimal characteristics, the sample undergoes final machining to achieve its working shape (Stage 8). An electrode of the specified size for ESD coating or a finished part of a more complex configuration is produced using an electrical discharge machine.

Thus, the process shown in Figure 1 and the described techniques enable targeted control of the free SHS compression process to produce TiC-NiCr-based metal-ceramic electrodes with a modified structure and specified functional properties.

3. Discussion

An analysis of the plots of temperature and combustion rate versus relative density (see Figure 2) revealed a non-monotonic relationship: with an initial increase in density, the temperature and combustion rate rise due to improved contact between particles, but after passing the extremum, they begin to decrease due to intensified heat dissipation. Thus, optimal densities corresponding to maximum heat release were established for each composition: 0.74 for TiC-NiCrAl and 0.73 for TiC-NiCrAlY. At these densities, the synthesized materials will remain in a plastic state longer during subsequent shear deformation, which is a key factor in improving their structure and properties.

To optimize the free SHS compression process, experiments were conducted varying the holding time and pressing pressure. It was found that pressing pressure significantly affects the porosity of the resulting compacts. Thus, at a pressure of less than 10 MPa, the porosity of the resulting compacts is maximal, amounting to 10%. As this parameter increases, porosity decreases, reaching less than 2% at pressure of 30 MPa. Further increases in pressure do not lead to a significant change in porosity, and when its value exceeds 100 MPa, it leads to the destruction of the resulting compacts. The optimal delay time before applying pressure was determined to be 2–4 s after the combustion wave has passed through the entire sample. When pressure is applied immediately after the combustion wave has passed and for less than 2 s, the phase and structure formation processes in the material do not proceed fully, which affects the formation of nonequilibrium and intermediate phases. When this parameter increases beyond 4 s, the material loses its plastic properties and the ability to form compact materials.

Based on the X-ray diffraction analysis (the unit cell parameters of the samples are presented in Table 3), all electrodes are known to consist of titanium carbide and a nichrome matrix (Figure 4). When aluminum was added to the synthesized material, an intermetallic compound with the stoichiometry $Al_{1,1}Ti_{0,9}$, was detected, which can be attributed to the non-stoichiometric modification

of γ -TiAl. Deviations from stoichiometry create defects in the crystal lattice (aluminum atoms replace titanium atoms), which generate internal stresses that impede dislocation movement, leading to additional strengthening of the nichrome matrix. A slight excess of aluminum in the resulting intermetallic compound improves the wettability of TiC particles during synthesis and subsequent deformation, which reduces porosity in the resulting electrodes. The additional introduction of yttrium into the initial mixture, due to its high chemical activity, promotes the formation of complex yttrium aluminates during synthesis. The formation of inter-

metallic compounds will have a beneficial effect on subsequent ESA coating applications using the resulting electrodes, as they lower the melting point of the electrode material and improve its wettability with the steel substrate. This will increase the transfer coefficient of the electrode material and ensure increased adhesion of the resulting coating. Furthermore, during coating operation under load, excess aluminum from the non-stoichiometric phase will more readily react with oxygen from the surrounding air, forming aluminum oxide nanolayers. This will create a self-lubricating effect, thereby reducing adhesive wear of the friction pair.

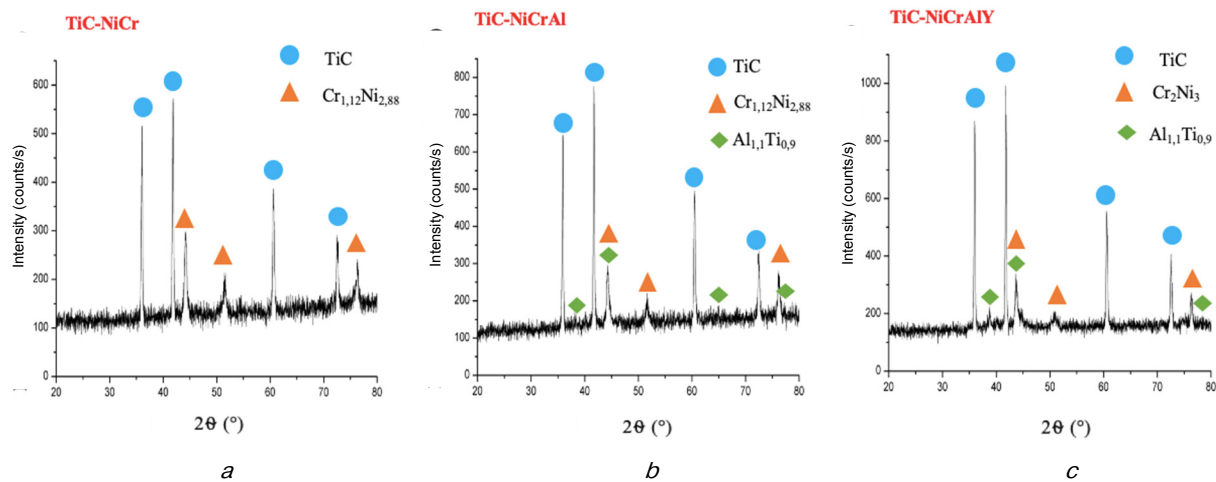


Figure 4. XRD results of the electrodes:
a – TiC–NiCr; *b* – TiC–NiCrAl; *c* – TiC–NiCrAlY
 Source: by I.A. Nazarko.

Table 3. XRD Results and Unit Cell Parameters

Electrode Composition	Phase	Lattice Type	PDF-2 Card	Lattice Parameter, Å
TiC–NiCr	TiC	Cubic (Fm-3m)	10-89-3828	$a = 4.3178$
	$Cr_{1,12}Ni_{2,88}$		30-65-5559	$a = 3.54$
TiC–NiCrAl	TiC	Cubic (Fm-3m)	32-1383	$a = 4.3274$
	$Cr_{1,12}Ni_{2,88}$		30-65-5559	$a = 3.54$
	$Al_{1,1}Ti_{0,9}$	Tetragonal (P4/mmm)	55-0252	$a = 3.9885, c = 4.0808$
TiC–NiCrAlY	TiC	Cubic (Fm-3m)	30-65-8804	$a = 4.322$
	Cr_2Ni_3		30-65-6291	$a = 3.579$
	$Al_{1,1}Ti_{0,9}$	Tetragonal (P4/mmm)	55-0252	$a = 3.9885, c = 4.0808$

Source: by I.A. Nazarko.

Based on the SEM analysis the obtained electrodes consist of rounded titanium carbide particles located in a matrix of a mixture of inter-

metallic compounds. Based on the obtained micrographs (Figure 5), it was found that the average particle size of TiC with the addition of aluminum

and yttrium decreases from 4.4 (TiC–NiCr) [26] to 3.4 (TiC–NiCrAl) and 3.1 (TiC–NiCrAlY) μm , respectively. In this case, the maximum particle size of TiC was 9 μm for the TiC–NiCr electrode, 6 μm for TiC–NiCrAl, and 5 μm for TiC–NiCrAlY. As a result of synthesis, the formed intermetallic compounds with aluminum are located on the surface of growing carbide grains, which creates a

barrier to the diffusion of carbon and titanium to the TiC grain. The addition of aluminum and yttrium produces a synergistic effect, resulting in even greater particle size reduction in TiC than when used separately. The resulting complex yttrium aluminates are also located at the grain boundaries of TiC, preventing the diffusion of titanium and carbon atoms toward them.

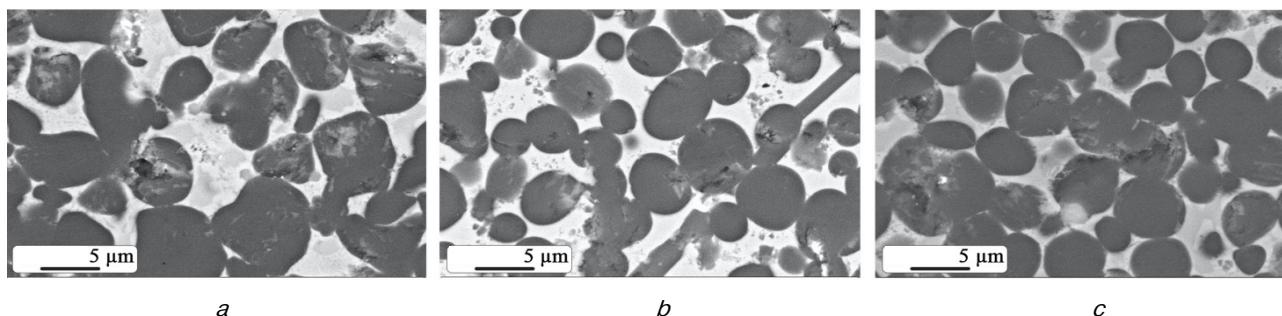


Figure 5. SEM images of the electrode microstructures:
a — TiC–NiCr; *b* — TiC–NiCrAl; *c* — TiC–NiCrAlY
 Source: by P.M. Bazhin.

Figure 6 shows the characteristic indentation curves for the electrodes of the three studied compositions. These curves resemble those for elastic-plastic bodies, but with a clear shift toward elasticity as aluminum and yttrium are alloyed. The TiC–NiCr electrode exhibits the largest area between the loading and unloading curves, corresponding to the greatest plastic deformation work of 181.4 nJ (Table 4). For the TiC–NiCrAl electrode, the loading curve becomes noticeably steeper due to an increase in hardness to 15.4 GPa, while the unloading curve is more vertical (shifts to the right), indicating an increase in the elastic modulus. The TiC–NiCrAlY electrode exhibits the steepest loading curve, indicating the material's maximum resistance to indentation. The obtained loading curves are smooth, without pronounced jumps, which emphasizes the absence of microcracking or the presence of pores in the studied electrodes.

The mechanical properties of the obtained electrodes were measured using experimental indentation dependences. It was found that additional alloying with aluminum and yttrium alters these properties due to the formation of additional phases and changes in the size of carbide grains (Table 3).

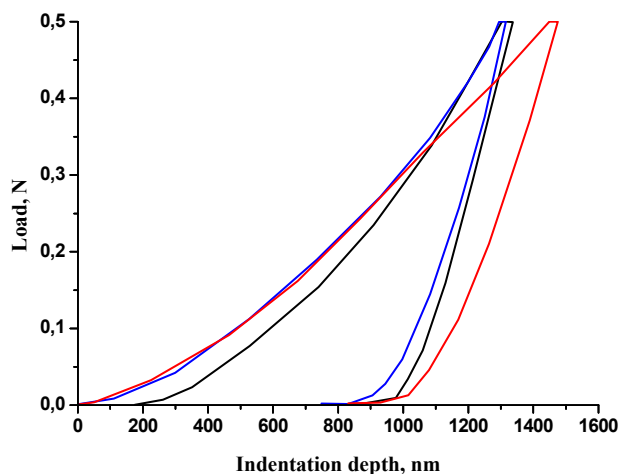


Figure 6. Loading/unloading dependencies for the electrodes:
 — TiC–NiCr; — TiC–NiCrAl; — TiC–NiCrAlY
 Source: by A.P. Chizhikov.

As can be seen from Table 4, additional alloying with aluminum and yttrium increases the hardness and elastic modulus of the obtained materials, but also reduces the work of elastic and plastic deformation. Elastic recovery remains virtually unchanged for all the electrodes studied, remaining at a level of 34–35%. During structure

formation, yttrium atoms form dispersed phases with yttrium, which are localized at the boundaries of TiC grains, preventing their migration. This will ensure the preservation of a fine-grained structure even under thermal exposure during electric spark discharges. Based on the Hall-Petch law, it can be argued that an increase in hardness and elastic

modulus indicates a refinement of the structural components in the electrodes. At the same time, the high density of grain boundaries and the presence of brittle intermetallic phases limit the free path of dislocations, which naturally leads to a decrease in the work of plastic deformation and the overall energy capacity of material failure.

Table 4. Average Values of the Mechanical Characteristics of the Electrodes

Electrode	Hardness (H), GPa	Elastic modulus (E), GPa	Elastic recovery (η), %	Elastic deformation work, nJ	Plastic deformation work, nJ	H/E	H^3/E^2
TiC–NiCr	13.0	305	34.8	94.8	181.4	0.042	0.023
TiC–NiCrAl	15.4	365	33.8	87.8	162.5	0.042	0.028
TiC–NiCrAlY	16.9	395	34.7	84.7	156.5	0.043	0.031

Source: by A.P. Chizhikov.

For the resulting electrodes, the H/E ratio characterizes the elasticity and the material’s ability to resist wear without damaging the structure. This parameter is slightly higher for the TiC–NiCrAlY electrode, which may indicate the efficiency of material transfer during ESA and the improved quality of the resulting diffusion layer. Due to the increased H/E ratio of 0.043, the TiC–NiCrAlY electrode material exhibits increased elasticity, resulting in smaller microdroplets formed during spark discharges. This will result in a smoother and denser coating on the steel surface, which is critical for protecting the steel from corrosion and wear. At lower H/E ratios, the electrode will be more prone to brittle spalling of entire macroparticles, which will increase the thickness of the applied coating but also reduce its continuity.

The H^3/E^2 ratio determines the maximum load an electrode can withstand before irreversible failure. As can be seen from Table 4, this ratio increases from 0.023 to 0.031 with additional alloying with aluminum and yttrium. As this ratio increases, the material becomes more resistant to microcrater formation, even under extreme point pressures. The TiC–NiCrAlY electrode has the highest H^3/E^2 ratio, indicating that the resulting coating performs well when used in an elastic mode. Therefore, the TiC–NiCrAlY electrode is recommended for applying coatings in precision

friction pairs where minimal wear is critical and a low friction coefficient is required. This electrode requires low discharge energy during ESA to avoid the development of internal stresses and cracking of the coating during crystallization on the steel substrate. For the TiC–NiCrAl electrode, the H^3/E^2 ratio is 0.028, indicating that the coating formed during ESA is more rigid than that formed with the TiC–NiCr electrode ($H^3/E^2 = 0.023$), but is less brittle than the coating formed with the yttrium electrode. The TiC–NiCr electrode can be recommended for coating steel components subject to high impact or bending conditions, due to the formation of a metal-ceramic layer whose mechanical behavior is as close as possible to that of steel.

Conclusion

The object of this study was metal-ceramic electrodes based on TiC–NiCrAl and TiC–NiCrAlY, intended for the application of wear-resistant coatings by the electrospark alloying method. In this work, a comprehensive process flowsheet was developed and implemented, including the preparation of powder charge blanks, cold pressing of blanks, synthesis and consolidation of materials by the free SHS compression method, as well as certification of the structure and properties of the obtained samples using X-ray diffraction analysis,

scanning electron microscopy and nanoindentation. Optimum process parameters were determined experimentally: the relative density of the charge blanks (0.74 for TiC–NiCrAl and 0.73 for TiC–NiCrAlY), pressure (30 MPa) and delay time before applying the load (2–4 s), ensuring the formation of pore-free compacts with a uniform fine-grained structure. The obtained results allow us to formulate the following conclusions.

1. A technological process for producing TiC–NiCr-based electrodes with additional alloying of the initial powder mixture with aluminum and yttrium was developed and optimized. It was found that the introduction of aluminum and yttrium into the initial powder mixture allows for the control of phase and structural transformations directly during the formation and consolidation of the material.

2. It was shown that additional alloying with aluminum and yttrium leads to the formation of new intermetallic phases (Al₁₁Ti_{0.9} and complex yttrium aluminates), which contribute to the improvement of the mechanical properties of the obtained electrodes: hardness up to 16.9 GPa, elastic modulus up to 395 GPa, and ratios $H/E = 0.043$ and $H^3/E^2 = 0.031$. The formation of these phases, as well as a reduction in the melting temperature of the electrode material and improved wettability with respect to the steel substrate, will increase the material transfer coefficient and adhesion of the coating applied by spark etching.

3. Practical recommendations are provided for the use of the resulting electrodes, depending on their composition, for applying protective coatings to metal surfaces.

References

1. Barile C, Casavola C, Pappalettera G, Renna G. Advancements in electrospark deposition (ESD) technique: A short review. *Coatings*. 2022;12(10):1536. <https://doi.org/10.3390/coatings12101536> EDN: NJNOUY
2. Wang Y, Zhang H, Liu J, Li X. Study on the properties of TiC coating deposited by spark discharge on the surface of AlFeCoCrNiCu high-entropy alloy. *Coatings*. 2024;14(3):421–435. <http://doi.org/10.3390/coatings14030421>
3. Pyachin SA, Nikolenko SV, Burkov AA, Suy NV. Electrospark coatings based on WC–Co alloys with aluminium oxide and carbon additives. *Materials Sciences and Applications*. 2013;4(4):186–190. <http://doi.org/10.4236/msa.2013.43022> EDN: PSPNRN

4. Vardanyan EL, Ramazanov KN, Nagimov RS, Nazarov AY. Properties of Intermetallic Ti–Al Based Coatings Deposited on Ultrafine-Grained Martensitic Steel. *Surface and Coatings Technology*. 2020;389:125657. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125657> EDN: PWJHDQ

5. Singh H, Singh J, Kumar S. Effect of processing conditions and electrode materials on the surface roughness of EDM-processed hybrid metal matrix composites. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2023;6(1):87–97. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2023.12.001>

6. Tkachenko YG, Yurchenko DZ, Timofeeva II, Britun VF. Effect from the composition of electrodes produced from TiC–(Fe–Cr–Al–Si) alloys on the formation, phase composition, and properties of wear- and oxidation-resistant electrospark-deposited coatings on steel. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2018;57(5–6):465–472. <https://doi.org/10.1007/s11106-018-0005-y>

7. Mertgenç E. Wear and corrosion behavior of TiC and WC coatings deposited on high-speed steels by electrospark deposition. *Open Chemistry*. 2023;21(1):1–11. <https://doi.org/10.1515/chem-2023-0187>

8. Nasakina EO, Baikin AS, Sergienko KV, Sevost'yanov MA, Kolmakov AG, Goncharenko BA, Zabolotnyi VT, Fadeev RS, Fadeeva IS, Gudkov SV, Solntsev KA. Biocompatibility of nanostructured nitinol with titanium or tantalum surface composite layers formed by magnetron sputtering. *Doklady Chemistry*. 2015;461(1):86–88. <https://doi.org/10.1134/S0012500815030027> EDN: SFEXAL

9. Kriani NK, Ramazanov KN, Mingazheva AA, Mingazhev AD. Effect of ion-implantation activation of surface of structural steels 40Kh AND 40KhN on structure and properties of nitrided layer. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2025;21(3):120–123. (In Russ.) <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2025-21-3-120-123> EDN: FCKVZS

10. Nazarov AY, Maslov AA, Ramazanov KN. Vacuum Arc Deposition of Y–Al–O Coating. *Russian Physics Journal*. 2024;66(11):1158–1161. <https://doi.org/10.1007/s11182-023-03057-1> EDN: ZGGEJK

10. Shinkaryov AS, Ozherelkov DY, Pelevin IA, Eremin SA, Anikin VN, Burmistrov MA, Chernyshikhin SV, Gromov AA, Nalivaiko AY. Laser fusion of aluminum powder coated with diamond particles via selective laser melting: powder preparation and synthesis description. *Coatings*. 2021;11(10):1219. <https://doi.org/10.3390/coatings11101219> EDN: SHWWLZ

12. Maslov AA, Nazarov AY, Syrtanov MS, Nikolaev AA, Ramazanov KN. Al–Cr/Y–Al–O Layer Coating Oxidation on Ti–Al–Nb Intermetallic Alloy during Heating and Thermal Cycles. *Russian Physics Journal*. 2024;66(11):1206–1211. <https://doi.org/10.1007/s11182-023-03063-3> EDN: RTVDIA

13. Zavitkov AV, Loktev AS, Lyukhter AB, Frolov KA. Methods for reducing nonmetallic inclusions in coatings applied by laser surfacing. *RUDN Journal of*

Engineering Research. 2023;24(3):271–278. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-271-278> EDN: UQGPAI

14. Haponova O, Tarelynyk V, Mościcki T, Tarelynyk N. Hybrid surface treatment technologies based on the electrospark alloying method. *Coatings*. 2025;15(6):721. <https://doi.org/10.3390/coatings15060721> EDN: QRIMRE

15. Podlesov VV, Stolin AM, Merzhanov AG. SHS extrusion of electrode materials and their application for electric-spark alloying of steel surfaces. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1992;63:1156–1165. <https://doi.org/10.1007/BF00853513>

16. Galyshev SN, Bazhin PM, Stolin AM, Sychev AE. Synthesis of Ti-AL-C based metal-ceramics under SHS-compression. *Perspektivnyye Materialy*. 2010;(2):81–86. (In Russ.) EDN: LRHJAF

17. Alymov MI, Stolin AM, Bazhin PM. Study of the structure and properties of protective coatings obtained by the method of electric spark alloying with SHS electrodes (Review). *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics*. 2022;88(2):40–48 (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-2-40-48> EDN: NBKVTM

18. Pankin NA, Mishkin VP. Electronic microscopy of the surface of SCMnCr3 steel after electric spark treatment with a tungsten electrode-anode. *Physical and Chemical Aspects of the Study of Clusters, Nanostructures and Nanomaterials*. 2023;(15):807–813. <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2023.15.807> EDN: JTIWVH

19. Burkov AA, Kulik MA. Electrospark deposition of Fe-Cr-Cu coatings on St3 steel. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2023;17(4):51–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-4-51-58> EDN: VJTQKY

20. Konevtsov LA, He VK, Kim ED, Eremina KP. Production of metal matrix alloys for wear-resistant electro-

spark coatings. *Transport Engineering*. 2022;4:51–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2022-4-51-59> EDN: TXTTWD

21. Lapshin OV, Boldyreva EV, Boldyrev VV. Role of Mixing and Milling in Mechanochemical Synthesis (Review). *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2021; 66:433–453. <https://doi.org/10.1134/S0036023621030116> EDN: BAVVXL

22. Amosov EA. Some Patterns of SHS Reactions. *Modern Materials, Equipment and Technologies*. 2016;(3): 10–14. (In Russ.) EDN: WTIINT

23. Seplyarskii BS, Kochetkov RA, Lisina TG, Abzailov NI. Patterns of synthesis of TiC–NiCr cermets from powder mixtures: influence of nichrome content and titanium particles size. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 2024;33(1):75–79. <https://doi.org/10.3103/S1061386224010060> EDN: DHSHOB

24. Kiryukhantsev-Korneev PV, Sytchenko AD, Levashov EA. Comparative study of coatings formed by electrospark alloying using TiC–NiCr and TiC–NiCr–Eu₂O₃ electrodes. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2019;60(6):662–672. <https://doi.org/10.3103/S1067821219060099> EDN: MZGYJG.

25. Bazhin P, Konstantinov A, Chizhikov A, Prokopenets A, Bolotskaia A. Structure, physical and mechanical properties of TiB–40 wt.% Ti composite materials obtained by unrestricted SHS compression. *Materials Today Communications*. 2020;25:101484. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101484> EDN: RRTGQL

26. Antipov MS, Chizhikov AP, Konstantinov AS, Bazhin PM. Sintered material based on titanium carbide to increase the service life of slide gates. *New Refractories*. 2021;(4):34–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2021-4-34-37> EDN: YPFYQB

About the authors

Ivan A. Nazarko, PhD student of the Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; Junior Researcher at Laboratory No. 7 of Plastic Deformation of Materials, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science, Russian Academy of Sciences, 8 Akademika Osipyan St, Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9076-1357, ORCID: 0009-0001-9850-2599; e-mail: nazarkovanya@yandex.ru

Andrey P. Chizhikov, PhD in Technical Sciences, Senior Researcher at Laboratory No. 7 of Plastic Deformation of Materials, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science, Russian Academy of Sciences, 8 Akademika Osipyan St, Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9233-6360, ORCID: 0000-0003-2793-6952; e-mail: chij@ism.ac.ru

Mikhail S. Antipov, PhD in Technical Sciences, Junior Researcher at Laboratory No. 7 of Plastic Deformation of Materials, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science, Russian Academy of Sciences, 8 Akademika Osipyan St, Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 7261-6449, ORCID: 0000-0002-7498-428X; e-mail: m_antipov@ism.ac.ru

Pavel M. Bazhin, DSc in Technical Sciences, Professor, Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; Deputy Director for Scientific Work, ISMAN Institute of Structural Macrokinetics and Problems of Material Science named after A.G. Merzhanov Russian Academy of Sciences, 8 Akademika Osipyan St, Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8117-0070, ORCID: 0000-0003-1710-3965, Scopus Id: 35768943700; e-mail: bazhin@ism.ac.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-2-182-192

EDN: KXWSWV

Научная статья / Research article

Алгоритм адаптивного управления динамическими процессами организационно-технической системы в нейросетевом вычислительном базисе

В.В. Пьянков[✉], Е.А. Ковалева^{id}, Л.О. Андреева^{id}, В.В. Алексеев^{id}

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ valeriy.pyankov@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 26 декабря 2025 г.

Доработана: 20 февраля 2026 г.

Принята к публикации: 25 февраля 2026 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта

При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Аннотация. Основная цель работы — разработка алгоритма адаптивного управления динамическими процессами организационно-технической системы в нейросетевом вычислительном базисе. Для решения задачи линейного программирования использовалась динамическо-статическая сеть для наглядности интерпретации нейросетевых решений и простоты реализации ограничений в виде неравенств. Алгоритм нейросетевого решения оптимизационной задачи адаптивного управления динамическими процессами организационно-технической системы включает в себя следующие этапы: подготовку исходных данных задачи и преобразование их к виду, удобному для представления в нейросетевом базисе; синтез нейронной сети; организацию обращений к нейросети с различными начальными состояниями динамических нейронов в течение отведенного времени и регистрация получаемых решений; выбор наилучшего нейросетевого решения из всех полученных при обращении к сети и интерпретация выбранного решения в рамках исходной задачи. Предложенный алгоритм решает проблему адаптивного управления сложными организационно-техническими системами, содержащими большое число элементов и подсистем и характеризующимися множественностью структур, задающих различные типы отношений между данными элементами и подсистемами.

Ключевые слова: нейронные сети с обратными связями, комбинаторная оптимизация, управление в условиях неопределенности, многомерные системы управления, динамические процессы, динамическо-статическая сеть

Вклад авторов

Пьянков В.В. — сбор и анализ данных, проведение исследований, разработка алгоритма, написание текста статьи; Ковалева Е.А. — научное руководство исследованием, планирование структуры статьи, методологическое сопровождение, редактирование текста; Андреева Л.О., Алексеев В.В. — участие в планировании исследования, научное консультирование, редактирование и доработка текста статьи. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования

Пьянков В.В., Ковалева Е.А., Андреева Л.О., Алексеев В.В. Алгоритм адаптивного управления динамическими процессами организационно-технической системы в нейросетевом вычислительном базисе // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 2. С. 182–192. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-182-192> EDN: KXWSWV

© Пьянков В.В., Ковалева Е.А., Андреева Л.О., Алексеев В.В., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Algorithm for Adaptive Control of Dynamic Processes in an Organizational and Technical System Within a Neural-Network Computational Framework

Valeriy V. Pyankov^{ID}✉, Ekaterina A. Kovaleva^{ID}, Larisa O. Andreeva^{ID}, Vladimir V. Alekseev^{ID}

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ valeriy.pyankov@gmail.com

Article history

Received: December 26, 2025

Revised: February 20, 2026

Accepted: February 25, 2026

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies.

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability

All data obtained during this study are included in the published article.

Abstract. The main objective of this study is to develop an algorithm for the adaptive control of dynamic processes in an organizational and technical system within a neural-network computational framework. To solve the set linear programming problem, a dynamic-static network was used to provide clear interpretation of neural network solutions and to simplify the implementation of inequality constraints. The algorithm for solving the optimization problem of adaptive control of dynamic processes in an organizational and technical system includes the following stages: preparation of the initial problem data and their transformation into a form convenient for representation in the neural network framework; synthesis of the neural network; organizing accesses to the neural network with different initial states of the dynamic neurons within the allotted time and recording the obtained solutions; selecting the best neural network solution from all those obtained when accessing the network and interpreting the selected solution within the scope of the original problem. The proposed algorithm addresses the problem of adaptive control of complex organizational and technical systems that include a large number of elements and subsystems and are characterized by multiple structures defining various types of relationships between these elements and subsystems.

Keywords: recurrent neural networks, combinatorial optimization, control under uncertainty, multidimensional control systems, dynamic processes, dynamic-static network

Authors' contribution

Pyankov V.V. — data collection and analysis, conducting the research, algorithm development, writing the text of the article; *Kovaleva E.A.* — scientific supervision of the research, planning of the article structure, methodological support, editing of the manuscript; *Andreeva L.O., Alekseev V.V.* — participation in research planning, scientific consulting, editing and revision of the manuscript. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Pyankov VV, Kovaleva EA, Andreeva LO, Alekseev VV. Algorithm for adaptive control of dynamic processes in an organizational and technical system within a neural-network computational framework. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(2):182–192. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-182-192> EDN: KXWSWV

Введение

Современные автоматизированные системы управления технологическими процессами сложных больших систем — это человеко-машинная система управления, представляющая собой совокупность аппаратно-программных средств, осуществляющая управление и контроль с принятием окончательного решения человеком, персоналом [1–3]. Как известно, цель создания и внедрения автоматизированных систем управления технологическими процессами

в любой области — это автоматизация и/или увеличение эффективности (как правило, ее составляющей — производительности) производственных процессов. Сложность и ответственность принимаемых человеком или автоматической решений по управлению потенциально опасными, рискованными операциями, операциями с высокой стоимостью ошибочных решений не всегда позволяет осуществлять управление в полностью автоматическом режиме.

Объективных причин, не позволяющих автоматизировать производства на 100 %, нес-

колько. Одна из них связана с факторами неопределенности принятия управленческих решений в организационно-технических системах. Теория принятия решений в условиях неопределенности занимала и занимает важнейшее место в современных мировых исследованиях. Неопределенность, понимаемая достаточно широко, рассматривается при этом как неполное, недостоверное знание или незнание компонент, характеристик, показателей и т. д., вплоть до полного незнания математического описания системы, относительно которой принимается решение. При этом принятие решений в условиях риска является частным случаем принятия решения в условиях неопределенности [3–5]. Данная трактовка позволяет развить единый подход ко всем вопросам принятия решений в условиях, отличающихся от полной определенности. Ввиду того что реалистичное принятие решения даже в сравнительно простой обстановке, как правило, связано с отсутствием полной определенности, позволяющей без обращения к идеализации применить детерминированный подход к принятию решения, становится ясным, сколь необходимо для современного центра управления технологическими процессами (ТП) в организационно-технических системах овладение методами принятия решений в условиях неопределенности. В таких случаях привлекаются неформальные методы системного анализа и его формальные методы, использующие математические и логические модели. Могут также использоваться лингвистические методы, опирающиеся на базы знаний, в которых неопределенность отражена лингвистическими средствами. Однако достижению широкого спектра методов и алгоритмов принятия решений необходимой достоверности, точности и оперативности препятствует размерность задачи выбора в условиях параметрической и/или структурной неопределенности. Динамично меняющиеся параметры состояния производственного или бизнес-процесса (например, со временем, в силу технологической деградации или изменений конъюнктуры рынков, уходящие в область параметров,

не наблюдаемую ранее), недоопределенные факторы внешней среды обуславливают необходимость постоянной оптимизации путем выбора соответствующих кортежей управляющих воздействий. Целью любой системы, являющейся системой верхнего уровня над автоматизированной системой управления технологическими процессами (АСУ ТП), в итоге является поиск наилучших условий реализации технологических процессов, проектирование и организация рациональных технологических схем, оптимальных исследований, приводящих к повышению качества функционирования организационно-технических систем.

1. Анализ литературы

Задача определения оптимальных параметров системы управления, т.е. параметров систем автоматизации, доставляющих минимум заданному критерию качества, как правило, решается на основе единственного подхода, основанного на поисковой процедуре, организованной по определенному алгоритму, входящему в состав методов нелинейного программирования [6–8]. В настоящее время известно большое число таких алгоритмов, причем их разнообразие вызвано, с одной стороны, стремлением получить алгоритм, обеспечивающий достаточно быструю сходимость поисковой процедуры, а с другой — учесть отсутствие каких-либо сведений о рельефе целевой функции в условиях как минимум параметрической неопределенности.

Помимо этого, в современном мире приходится иметь дело с многомерным поиском, когда поверхности целевой функции характеризуются наличием оврагов с устойчивыми локальными минимумами и такими областями, в которых кривизна линий разных значений критерия (линий уровней) существенно различается в разных точках. Кроме того, при линейном росте числа управляющих параметров ТП, высокоразмерных векторах управляемых переменных экспоненциально возрастает время поиска в многомерном пространстве состояний [8; 9].

Современные ТП, например в экономике, транспортной отрасли, промышленности характеризуются числом управляющих переменных от десятков до нескольких сотен, переменных состояния — от нескольких сотен до нескольких тысяч. При этом для задач оценки состояния нелинейного ТП в 10–20 взаимосвязанных параметрах и выбора оптимального управления с предварительным измерением, распознаванием этапов, фрагментов ТП в реальном масштабе времени необходимо быстрое действие порядка $10^{12} \dots 10^{15}$ операций в секунду. Достижение указанных показателей для точной (аналитической) обработки с применением существующих методов и средств является проблематичным даже для организационных систем. В этих системах выработка управляющих воздействий осуществляется не в реальном масштабе времени, а использование приближенных методов получения оптимальных решений в ряде случаев неприемлемо.

Можно утверждать, что именно цифровизация ТП, позволяющая учитывать при управлении гигантское число системных и внесистемных факторов влияния, обуславливает высокую (вычислительно нереализуемую классическими методами) размерность состояния объектов управления в современных организационно-технических системах [12; 13].

Таким образом, возникает прагматическое противоречие, с одной стороны, между необходимостью повышения достоверности, точности и оперативности планирования и реализации управления современными ТП в организационно-технических системах, с другой стороны — увеличением размерности и неопределенности их пространства состояний, обуславливающих рост рисков ошибочных управляющих воздействий в комбинаторном пространстве возможных решений.

Современные направления решений задач преодоления проблем экспоненциального взрыва при попытках учета гигантского числа факторов для повышения эффективности и минимизации ошибочных решений концентрируются в направлении приоритетных для данного

применения разделов искусственного интеллекта и максимального коннекционизма однородных вычислительных сред, методологией которых является машинное обучение [10–11; 14–19].

В случае с однородными вычислительными средами речь идет об аппаратных реализациях полносвязных моделей нейронных сетей с Хопфилда (динамических нейронных сетей с обратными связями), на основе моделей физики твердого тела — моделей Изинга и Гейзенберга, а также многослойных архитектур на основе сетей VProp.

Однако именно здесь формируется научное противоречие, связанное с отсутствием научно-методического обеспечения решения задач формирования целевых функций комбинаторной оптимизации и, собственно, интерпретации искомого решения в пространстве параметров динамических систем описываемого класса.

Без разрешения научного противоречия невозможна адаптация моделей и методов решения задач комбинаторной оптимизации большой размерности применительно к многомерным организационно-техническим процессам в условиях структурной и параметрической неопределенности их состояния и факторов внешней среды.

2. Результаты и обсуждение

Сложные организационно-технические системы включают в себя большое число элементов и подсистем и характеризуются множественностью структур, задающих различные типы отношений между данными элементами и подсистемами.

При этом сами процессы создания, эксплуатации и развития систем данного класса также представляют собой сложные процессы, реализация которых на практике с использованием традиционного в таких ситуациях метода проб и ошибок уже становится невозможной по множеству причин (финансовых, экологических, гуманитарных и т. п.) [20; 21].

Одним из направлений решений проблемы автоматического поиска оптимальных управля-

ющих воздействий при управлении такими системами является перевод логики управления в нейросетевой логический базис.

NP-полнота этой оптимизационной задачи позволяет сделать вывод о неэффективности использования для ее решения традиционных вычислительных методов и средств, особенно в условиях возможных ограничений на время решения задачи [22]. Последнее же имеет место в случае возникновения необходимости оперативного формирования нового плана функционирования организационно-технической системы.

Для решения оптимизационных задач целесообразно использовать однослойные сети с обратными связями и обучением без учителя. В частности, для решения задач линейного программирования наиболее пригодными являются динамическо-статические сети, что объясняется наглядностью интерпретации нейросетевых решений и простотой реализации ограничений в виде неравенств [23]. Архитектура такой нейросети представлена на рис.

Существо нейросетевого решения оптимизационных задач основано на свойстве сети минимизировать свою энергию. Нейросеть содержит слой D динамических нейронов и слой S статических нейронов. Динамика сети описывается системой дифференциальных и алгебраических уравнений следующего вида:

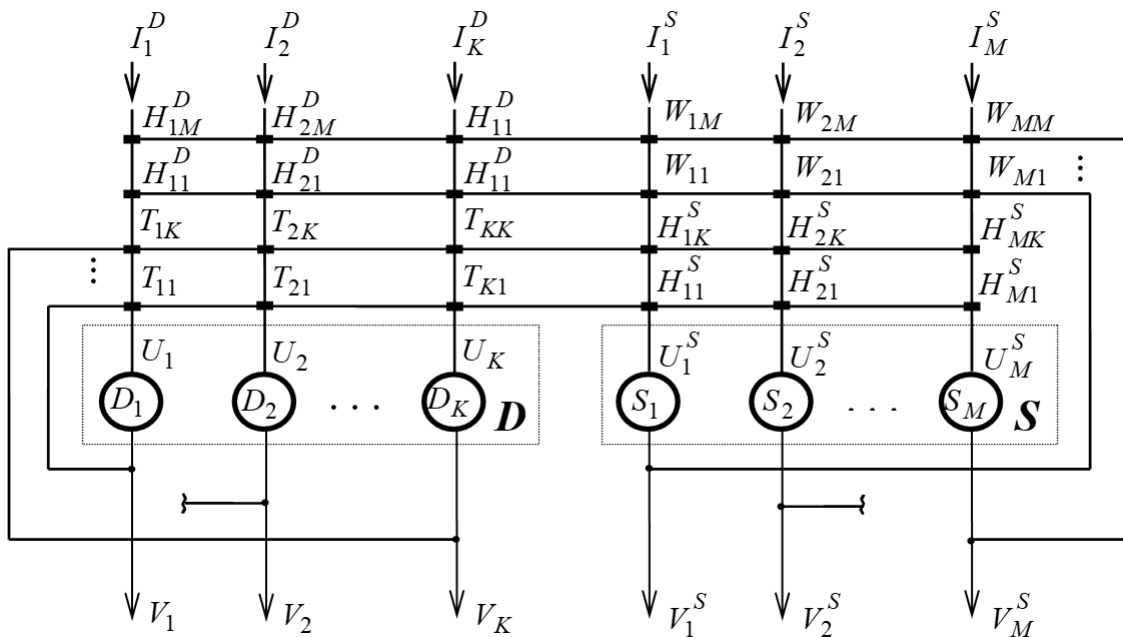
$$\frac{dU_i}{dt} = -\frac{U_i}{\tau_i} + \sum_{j=1}^K T_{ij} V_j - I_i^D + \sum_{l=1}^M H_{il}^D V_l^S; \quad (1)$$

$$U_k^S = \sum_{j=1}^n H_{kj}^S V_j + I_k^S + \sum_{l=1}^m W_{kl} V_l^S; \quad (2)$$

$$V_i = g(U_i), \quad V_i(t_0) = g(U_i(t_0)) = V_i^{(0)},$$

$$V_k^S = g^S(U_k^S), \quad (3)$$

где V_j — выход j -го динамического нейрона, $j = \overline{1, K}$; V_l^S — выход l -го статического нейрона, $l = \overline{1, M}$;



Пример архитектуры динамическо-статической нейросети

Источники: выполнено В.В. Пьянковым.

An example of the architecture of a dynamic-static neural network

Source: by V.V. Pyankov

Функция энергии для рассматриваемой системы определяется выражением

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K T_{ij} V_i V_j + \sum_{i=1}^K I_i^D V_i + \sum_{i=1}^K \frac{1}{\tau_i} \int_0^{V_i} g^{-1}(v) dv - \sum_{l=1}^M G(U_l^S), \quad (4)$$

где $G(U_l^S) = \int_0^{Y_l} g^S(v) dv$.

Синтезируем нейронную сеть для решения поставленной задачи планирования. Для удобства представления задачи в нейросетевом базисе V необходимо преобразовать треугольную матрицу \tilde{X} в вектор X^* . Для этого каждому элементу треугольной матрицы \tilde{X} поставим в соответствие элемент вектора X^* : $\tilde{x}_{np} = x_i^*$, где $i = (0,5n(2N - n - 1) + p)$, $n = \overline{0, N-1}$, $p = \overline{n+1, N}$. Таким образом, $i \in \overline{1, K}$, $K = 0,5N(N+1)$.

Преобразуем величины и ограничения: $c_i^* = c_n$, $v_i^* = v_n$, где $n = i - (j-1)(N - 0,5j)$, $j \in \overline{1, N}$, удовлетворяющие условию

$$j = \min_{j^* \in \overline{1, N}} \left\{ j^* : i \leq j^* (N - 0,5(j^* - 1)) \right\},$$

Преобразуем параметры ограничений

$$\lambda_i^* = \lambda_{np}, \quad d_i^* = \tilde{d}_{np}, \quad (5)$$

где $i = (0,5n(2N - n - 1) + p)$, $n = \overline{0, N-1}$, $p = \overline{n+1, N}$.

В итоге формализованная постановка задачи примет следующий вид:

$$X^{*o} = (x_1^{*o}, x_2^{*o}, \dots, x_K^{*o}), \quad x_i^{*o} \in \{0, 1\}, \quad i \in \overline{1, K},$$

что определит такой вектор

$$X^{*o} = \arg \max_{\Omega_{X^*}} \left\{ \Phi(X^*) \right\}, \quad (6)$$

где $\Phi(X^*) = \sum_{i=1}^K x_i^* c_i^*$, а элементы векторов из множества Ω_{X^*} удовлетворяют следующим ограничениям:

$$x_i^* \leq \overline{d_i^*}, \quad i = \overline{1, K}; \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^K x_i^* \lambda_i^* \leq \overline{W_{\rho'}}, \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^K x_i^* v_i^* \leq \overline{V_{\text{инф}}}, \quad (9)$$

$$\sum_{i=q}^{2q-1} x_{q+(i-q)(N-0,5(i-q+1))}^* \geq \sum_{i=qN+1-0,5q(q-1)}^{(q+1)N-0,5q(q+1)} x_i^*,$$

$$q = \overline{1, N-1}; \quad (10)$$

$$\sum_{i=nN+1-0,5n(n-1)}^{(n+1)(N-0,5n)} x_i^* \leq 1, \quad n = \overline{0, N-1}; \quad (11)$$

$$\sum_{i=p}^{2p-1} x_{p+(i-p)(N-0,5(i-p+1))}^* \leq 1, \quad p = \overline{1, N}. \quad (12)$$

Компактная запись неравенств (8)–(12) имеет вид

$$\sum_{i=1}^K a_{li} x_i^* \leq \overline{b_l}, \quad l = \overline{1, M}, \quad (13)$$

где $M = 0,5N(N+1) + 3N + 1$.

Левая часть неравенства (13) есть l-й элемент вектора, являющегося результатом произведения матрицы A и вектора X^{*T} , а правая часть — элемент вектора B :

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1K} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{M1} & a_{M2} & \dots & a_{MK} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{(K,K)}^{(1)} \\ \text{-----} \\ A_{(1,K)}^{(2)} \\ \text{-----} \\ A_{(1,K)}^{(3)} \\ \text{-----} \\ A_{(N-1,K)}^{(4)} \\ \text{-----} \\ A_{(N,K)}^{(5)} \\ \text{-----} \\ A_{(N,K)}^{(6)} \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} d_1^* \\ \vdots \\ d_K^* \\ W_3 \\ V_{U^{TM}} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

где блок-матрица $\mathbf{A}_{\langle K,K \rangle}^{(1)}$ — единичная матрица; $\mathbf{A}_{\langle 1,K \rangle}^{(2)} = (\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_K^*)$ — вектор-строка; $\mathbf{A}_{\langle 1,K \rangle}^{(3)} = (v_1^*, v_2^*, \dots, v_K^*)$ — вектор-строка, а элементы блок-матриц $\mathbf{A}_{\langle N-1,K \rangle}^{(4)}$, $\mathbf{A}_{\langle N,K \rangle}^{(5)}$, $\mathbf{A}_{\langle N,K \rangle}^{(6)}$ определяются следующим образом:

$$a_{li}^{(4)} = \begin{cases} -1, & \text{при } i = l + (k-l)(N-1) - \\ & -0,5(k-l)(k-l-1), \\ & k = \overline{l, 2l-1} \\ 1, & \text{при } lN + 1 - 0,5l(l-1) \leq i \leq \\ & \leq (l+1)N - 0,5l(l+1) \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

$$l = \overline{1, N-1},$$

$$a_{li}^{(5)} = \begin{cases} 1, & \text{при } (l-1)N + 1 - \\ & -0,5(l-1)(l-2) \leq i \leq \\ & \leq l(N-1) + 1 - 0,5l(l+1) \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

$$l = \overline{1, N},$$

$$a_{li}^{(6)} = \begin{cases} 1, & \text{при } i = l + (k-l)(N-1) - \\ & -0,5(k-l)(k-l-1), \\ & k \in \overline{l, 2l-1} \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}.$$

Методика синтеза нейронной сети включает в себя три этапа: нейросетевую интерпретацию исходной постановки задачи; конструирование энергетической функции; определение параметров сети:

1. *Нейросетевая интерпретация задачи.* Каждой переменной x_i^* поставим в соответствие выходной сигнал i -го динамического нейрона V_i : $x_i^* \in \{0, 1\} \Leftrightarrow V_i \in \{0, 1\}$. Интерпретируем для нейросети функционал (6) и ограничения (13):

$$V^\circ = \arg \max_{\Omega_V} \{\Phi(V)\}, \quad (15)$$

где $\Phi(V) = \sum_{i=1}^K c_i^* V_i$, а состояния выходов V динамических нейронов из множества Ω_V удовлетворяют ограничениям

$$\sum_{i=1}^K a_{li} V_i \leq b_l, l = \overline{1, M}. \quad (16)$$

2. *Конструирование энергетической функции.* Конструируемая энергетическая функция в общем виде имеет вид суммы

$$E^C(V) = E_\psi^C(V) + E_\beta^C(V) + E_\phi^C(V), \quad (17)$$

где первый компонент обеспечивает при своей минимизации выполнение ограничений (13), минимум второго достигается при равенстве выходных сигналов динамических нейронов нулю или единице.

В развернутом виде конструируемая энергетическая функция может быть представлена следующим образом:

$$E^C(V) = \frac{C_\psi}{2} \sum_{l=1}^M \left[\Theta \left(\sum_{i=1}^K a_{li} V_i - b_l \right) \right]^2 + \frac{C_\beta}{2} \sum_{i=1}^K V_i (1 - V_i) + C_\phi \sum_{i=1}^K (-c_i^* V_i), \quad (18)$$

где $\Theta(\cdot)$ — штрафная функция, определяемая выражением $\Theta(z) = \begin{cases} z, & z > 0; \\ 0, & z \leq 0. \end{cases}$ C_ψ, C_β, C_ϕ — положительные коэффициенты.

3. *Определение параметров сети.* Для обеспечения устойчивости динамическо-статической нейросети необходимо, чтобы матрица весов (синаптических коэффициентов) выходов статических нейронов на входе динамических нейронов представляла собой транспонированную матрицу весов (синаптических коэффициентов) выходов динамических нейронов на входе статических нейронов. Приравняем полученное выражение для сконструированной функции (18) выражению (4) и, принимая допущение о том, что функция активации статических нейронов $g^S(\cdot)$ и функция штрафа $\Theta(\cdot)$ за нарушение ограничений совпадают с точностью до константы, определим искомые параметры динамическо-статической сети для решения рассматриваемой задачи:

$$T_{ij} = \delta_{ij} C_{\beta}, I_i^D = -C_{\phi} c_i^* + \frac{C_{\beta}}{2},$$

$$H_{il}^D = -\psi a_{li}; \quad (19)$$

$$W_{kl} = 0, I_l^S = -\psi b_l, H_{li}^S = -C_{\psi} a_{li},$$

$$i, j \in \overline{1, K}, k, l \in \overline{1, M}, \quad (20)$$

где δ_{ij} — символ Кронекера.

Алгоритм нейросетевого решения оптимизационной задачи адаптивного управления динамическими процессами организационно-технической системы включает в себя следующие этапы.

1. Подготовка исходных данных задачи и преобразование их к виду, удобному для представления в нейросетевом базисе.

2. Синтез нейронной сети согласно приведенной выше методике.

3. Организация обращений к нейросети с различными начальными состояниями динамических нейронов в течение отведенного времени и регистрация получаемых решений.

4. Выбор наилучшего нейросетевого решения из всех полученных при обращении к сети и интерпретация выбранного решения в рамках исходной задачи.

Под наилучшим нейросетевым решением понимают такой вектор V , при котором достигается наибольшее значение целевого функционала $\Phi(V)$ при условии, что выполнены ограничения (16).

Заключение

Разработан алгоритм адаптивного управления динамическими процессами организационно-технической системы в нейросетевом вычислительном базисе. Необходимость разработки алгоритма обусловлена тем, что сложные организационно-технические системы включают в себя большое число элементов и подсистем и характеризуются множественностью структур, задающих различные типы отношений между данными элементами и подсистемами и обеспечивающих материальное, энергетическое, информационное взаимодействие в них. При этом сами процессы создания, эксплуатации и развития систем данного класса также представляют собой сложные процессы, реализация которых на практике с использованием традиционно используемого в таких ситуациях метода проб и ошибок уже становится невозможной. NP-полнота этой оптимизационной задачи позволяет сделать вывод о неэффективности использования для ее решения традиционных вычислительных методов и средств, особенно в условиях возможных ограничений на время решения задачи. Для решения оптимизационных задач в работе использованы однослойные сети с обратными связями и обучением без учителя. В частности, для решения задач линейного программирования наиболее целесообразными архитектурами определены динамическо-статические сети, что объясняется наглядностью интерпретации нейросетевых решений и простотой реализации ограничений в виде неравенств. Методика синтеза нейронной сети включает в себя три этапа: нейросетевую интерпретацию исходной постановки задачи; конструирование энергетической функции; определение параметров сети.

Список литературы

1. Демидов Я.П. Организационные системы: метрология результативности и инновационные принципы менеджмента // Менеджмент в России и за рубежом. 2013. № 5. С. 126–133. EDN: RUSGRV

2. Бухт Р., Хикс Р. Определение, концепция и измерение цифровой экономики // Вестник международных организаций: образование, наука, новая экономика. 2018. Т. 13. № 2. С. 143–172. EDN: YXBNWX

3. Дворецкий С.И., Дворецкий Д.С., Акулинин Е.И. Постановки задач оптимизации при интегрированном проектировании технологических процессов, аппаратов и систем управления в условиях неопределенности // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2024. Т. 30. № 2. С. 184–195. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2024.02> EDN: DBKICR

4. Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S. Self-tuning of a neural network controller with an integral estimate of contradictions between the commands of the learning algorithm and memory // Automation and Remote Control. 2018. Vol. 79. P. 327–336. <https://doi.org/10.1134/S000511791802011X> EDN: XXVCAH

5. Sheridan T.B. Human-robot interaction: status and challenges // Human Factors. 2016;58(4), 525–532. <https://doi.org/10.1177/0018720816644364> EDN: XXVCAH

6. Pushpavanam S. (ed.) Control and Optimisation of process systems. Advances in chemical engineering // Academic Press (Elsevier). 2013. Vol. 43. ISBN 9780123965240

7. Marlin T.E. Process Control: Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance. McGraw-Hill Education Publ.; 2015. 1008 p. ISBN 0070393621, 9780070393622

8. Чекмаев С.Ю. Оптимизация режимов работы автоматической системы управления технологическим процессом // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2008. Т. 4. № 4. С. 3–8. EDN: JUSPJD

9. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: соответствуют ли ее основные положения действительности? // Промышленные АСУ и контроллеры. 2007. № 3. С. 1–5. EDN: KYCUZX

10. Лукин Н.А. Бортовые функционально-ориентированные процессоры на основе однородных вычислительных сред для мобильных систем реального времени // Фундаментальные исследования. 2015. № 12-5. С. 924–929. EDN: VLDBRB

11. Лукин Н.А., Филимонов А.Ю. Технологии программирования алгоритмов на архитектурах однородных вычислительных сред // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2017. № 40. С. 61–70. <https://doi.org/10.17223/19988605/40/7> EDN: ZHJMDX

12. Борисов В.В., Бычков И.А., Дементьев А.В., Соловьев А.П., Федулов А.С. Компьютерная поддержка сложных организационно-технических систем. Москва : Горячая линия — Телеком, 2002. 154 с. ISBN 5-93517-111-2

13. Дадаян Л.Г. Организационные системы: моделирование и управление. Москва : Инфра-Инженерия, 2022. 180 с. ISBN 978-5-9729-0826-4 EDN: YKERZN

14. Бурцев М.С., Бухвалов О.Л., Ведяхин А.А. и др. Сильный искусственный интеллект: На подступах к сверхразуму. Москва : Альпина паблишер: Интеллектуальная литература, 2021. 232 с. ISBN 978-5-907394-18-6

15. Haykin S. Neural networks and learning machines. 3rd ed. Pearson Education; 2009. ISBN 9780131471399

16. Bishop C.M. Pattern recognition and machine learning. Springer Publ., 2006. ISBN 978-0-387-31073-2

17. Latorre Carmona P., Sánchez J.S., Fred A.L.N. Mathematical methodologies in pattern recognition and machine learning: Contributions from ICPRAM 2012. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics. Vol. 30. Springer Publ., 2014. 196 p. ISBN 978-1-4614-5075-7

18. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep learning. MIT Press, 2016. ISBN 9780262035613.

19. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning // Nature. 2015. Vol. 521. P. 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>

20. Garey M.R., Johnson D.S. Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness. San Francisco : W.H. Freeman Publ., 1979. 338 p. ISBN 0716710455

21. Freeman J.A., Skapura D.M. Neural networks: algorithms, applications, and programming techniques. Reading, MA: Addison-Wesley Publ., 1992. 401 p. ISBN 0201513765

22. Nocedal J., Wright S.J. Numerical optimization. 2nd ed. New York : Springer Publ., 2006. ISBN 978-0-387-30303-1

23. Терехов В.А. Управление в динамических системах: современные задачи и подходы // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 6. С. 20–29. EDN: NWHFJN

References

1. Demidov YaP. Organizational systems: performance metrology and innovative management principles. *Management in Russia and Abroad*. 2013;(5):126–133. (In Russ.) EDN: RUSGRV

2. Bukht R, Heeks R. Defining, conceptualising and measuring the digital economy. *International Organisations Research Journal*. 2018;13(2):143–172. (In Russ.) EDN: YXBNWX

3. Dvoretzky SI, Dvoretzky DS, Akulinin EI. Setting optimization problems in the integrated design of techno-

logical processes, devices and control systems in conditions of uncertainty. *Transactions of the Tambov State Technical University*. 2024;30(2):184–195. (In Russ.) <https://doi.org/10.17277/vestnik.2024.02.pp.184-195> EDN: DBKICR

4. Ryabchikov MYu, Ryabchikova ES. Self-tuning of a neural network controller with an integral estimate of contradictions between the commands of the learning algorithm and memory. *Automation and Remote Control*. 2018;79:327–336. <https://doi.org/10.1134/S000511791802011X>

5. Sheridan TB. Human–robot interaction: status and challenges. *Human Factors*. 2016;58(4):525–532. <https://doi.org/10.1177/0018720816644364>

6. Pushpavanam S. *Control and optimization of process systems. Advances in chemical engineering*. Elsevier Science, 2013;43. ISBN 978-0-12-396524-0

7. Marlin TE. *Process Control: Designing processes and control systems for dynamic performance*. New York: McGraw-Hill Education, 2015. ISBN 978-0-07-039362-2

8. Chekmaev SU. Optimization of operating modes of an automatic control system by technological process. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*. 2008;4(4):3–8. (In Russ.) EDN: JUSPJD

9. Rotach VYa. Automatic control theory: do its basic concepts comply with the reality? *Industrial ACS and Controllers*. 2007;(3):1–5. (In Russ.) EDN: KYCUZX

10. Lukin NA. On-board functional oriented processors based on homogenous computer environment for mobile real-time systems. *Fundamental Research*. 2015; (12-5):924–929. (In Russ.) EDN: VLDBRB

11. Lukin NA, Filimonov AYu. Programming technologies for algorithms on homogeneous computing architectures. *Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 2017;(40):61–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.17223/19988605/40/7> EDN: ZHJMDX

12. Borisov VV, Bychkov IA, Dementiev AV, Soloviev AP, Fedulov AS. *Computer support of complex organizational-technical systems*. Moscow: Goryachaya Liniya — Telekom; 2002. (In Russ.) ISBN 5-93517-111-2

13. Dadayan LG. *Organizational systems: Modeling and management*. Moscow: Infra-Engineering; 2022. ISBN 978-5-9729-0826-4. (In Russ.) EDN: YKERZN

14. Burtsev MS, Bukhvalov OL, Vedyakhin AA, et al. *Strong Artificial Intelligence: On the Threshold of Superintelligence*. Moscow: Alpina Publ.; 2021. (In Russ.) ISBN 978-5-907394-18-6

15. Haykin S. *Neural networks and learning machines*. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education Publ., 2009. ISBN 978-0-13-147139-9

16. Bishop CM. *Pattern recognition and machine learning*. New York: Springer Publ.; 2006. ISBN 978-0-387-31073-2

17. Latorre Carmona P, Sánchez JS, Fred ALN. Mathematical methodologies in pattern recognition and machine learning: Contributions from ICPRAM 2012. *Springer Proceedings in Mathematics & Statistics*. Springer Publ.; 2012. ISBN 978-1-4614-5075-7

18. Goodfellow I, Bengio Y, Courville A. *Deep learning*. Cambridge, MA: MIT Press; 2016. ISBN 978-0-262-03561-3

19. LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning. *Nature*. 2015;521:436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>

20. Garey MR, Johnson DS. *Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness*. San Francisco: W.H. Freeman; 1979. ISBN 0-7167-1045-5

21. Freeman JA, Skapura DM. *Neural networks: Algorithms, applications, and programming techniques*. Reading, MA: Addison-Wesley Publ.; 1992. ISBN 0-201-51376-5

22. Nocedal J, Wright SJ. *Numerical optimization*. 2nd ed. New York: Springer Publ.; 2006. ISBN 978-0-387-30303-1

23. Terekhov VA. Control in dynamical systems: modern challenges and approaches. *Proceedings of Southern Federal University. Engineering Sciences*. 2011;(6):20–29. (In Russ.) EDN: NWHFJN

Сведения об авторах

Пьянков Валерий Валерьевич, аспирант кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-code: 8494-9430, ORCID: 0009-0003-5760-6732; e-mail: valeriy.pyankov@gmail.com

Ковалева Екатерина Александровна, кандидат экономических наук, доцент кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; Scopus Author ID 57195917491, Researcher ID G9799-2017, eLIBRARY SPIN-код: 1654-4395, ORCID: 0000-0002-4937-528X; e-mail: kovaleva_ea@rudn.ru,

Андреева Лариса Олеговна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 2258-3926, ORCID: 0000-0002-3587-7350; e-mail: andreeva_lo@rudn.ru

Алексеев Владимир Витальевич, доктор технических наук, профессор кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 9320-9713, ORCID:0000-0002-0398-4426; e-mail: vvalex1961@mail.ru

About the authors

Valeriy V. Pyankov, PhD student, Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8494-9430, ORCID: 0009-0003-5760-6732; e-mail: valeriy.pyankov@gmail.com

Ekaterina A. Kovaleva, PhD in Economics, Associate Professor of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; Scopus Author ID 57195917491, Researcher ID G9799-2017, eLIBRARY SPIN-code: 1654-4395, ORCID: 0000-0002-4937-528X; e-mail: kovaleva_ea@rudn.ru

Larisa O. Andreeva, PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-код: 2258-3926, ORCID: 0000-0002-3587-7350; e-mail: andreeva_lo@rudn.ru

Vladimir V. Alekseev, DSc in Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9320-9713, ORCID:0000-0002-0398-4426; e-mail: vvalex1961@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-2-193-202

EDN: KYMATZ

Научная статья / Research article

Сравнительный анализ объектных систем хранения данных с открытым исходным кодом

С.А. Таст[✉], М.С. Мосева[✉]

Московский технический университет связи и информатики, Москва, Российская Федерация
✉ s.a.tast@edu.mtuci.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 12 декабря 2025 г.

Доработана: 13 февраля 2026 г.

Принята к публикации: 15 февраля 2026 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта

При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Аннотация. Объектом исследования в работе выступают открытые объектные системы хранения данных — Ceph, OpenStack Swift и MinIO — рассматриваемые в контексте их применимости для безопасного и эффективного хранения мультимедиа данных в корпоративных коммуникационных системах. Метод исследования основан на сравнительном анализе ключевых характеристик: архитектурных особенностей, производительности при работе с различными типами файлов (включая мелкие и крупные мультимедиа объекты), уровня отказоустойчивости, простоты развертывания и совместимости с распространенными протоколами, такими как S3 API. Результаты анализа показали, что Ceph обеспечивает высокую отказоустойчивость и универсальность за счет поддержки блочных, объектных и файловых интерфейсов, что делает его оптимальным для масштабных инфраструктур и контейнерных сред. OpenStack Swift отличается простотой интеграции в экосистему OpenStack, однако демонстрирует сниженную производительность при обработке множества мелких файлов. MinIO выделяется как легковесное и высокопроизводительное решение с нативной поддержкой S3 API, что определяет его как наиболее подходящее для рассматриваемой задачи. Подчеркивается также необходимость предварительного анализа доминирующих типов мультимедийного контента при проектировании хранилища для достижения максимальной эффективности.

Ключевые слова: хранение данных, файловая система, объектная структура, протокол s3, Ceph, MinIO, Openstack Swift

Вклад авторов

Таст С.А. — реализация исследования, сбор и обработка материалов, написание текста; Мосева М.С. — концепция и дизайн исследования, экспертная поддержка. Оба автора ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования

Таст С.А., Мосева М.С. Сравнительный анализ объектных систем хранения данных с открытым исходным кодом // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 2. С. 193–202. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-193-202> EDN: KYMATZ

© Таст С.А., Мосева М.С., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Comparative Analysis of Open-Source Object Data Storage Systems

Sergey A. Tast[✉], Marina S. Moseva^{ID}

Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russian Federation

✉ s.a.tast@edu.mtuci.ru

Article history

Received: December 12, 2025

Revised: February 13, 2026

Accepted: February 15, 2026

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies.

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability

All data obtained during this study are included in the published article.

Authors' contribution

Tast S.A. — research conduction, collection and processing of materials, text writing; Moseva M.S. — research concept and design, expert support. Both of the authors read and approved the final version of the article.

For citation

Tast SA, Moseva MS. Comparative analysis of open-source object data storage systems. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(2):193–202. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-193-202> EDN: KYMATZ

Введение

В рамках предоставления услуг корпоративного мессенджера неизбежно возникает потребность хранения больших объемов пользовательских файлов. В настоящее время в рассматриваемом авторами мессенджере объем потребности насчитывает в среднем 24 терабайта хранимых файлов в год, однако этот показатель имеет тенденцию к увеличению. Период хранения составляет минимум 1 год (с возможностью продления срока). При удалении учетной записи пользователя файлы, владельцем которых

являлся этот пользователь, необходимо сохранять в течение 1 календарного месяца.

Цель исследования — выбор оптимального решения для предоставления пользователям возможности удаленного хранения неограниченных по размеру данных произвольного формата. Наибольший интерес для реализации запроса представляют открытые решения.

Согласно Национальному стандарту Российской Федерации ГОСТ Р 7.0.95-2015¹, электронный объект — это файл (или совокупность файлов), формируемый в компьютерной программе пользователя или в автоматизиро-

¹ ГОСТ Р 7.0.95-2015. Электронные документы. Основные виды, выходные сведения, технологические характеристики. Москва : Стандартинформ, 2015. 23 с.

ванной системе и содержащий в зафиксированном виде данные, предназначенные для восприятия с помощью средств вычислительной техники [1].

Файл — это именованная часть диска [2].

Ниже перечислим основные существующие типы систем хранения данных [3].

1. *Файловое хранилище* — традиционная модель хранения данных, где информация организована в иерархическую структуру [4]. Это наиболее распространенный и простой тип структурированного хранения данных, который чаще всего можно найти на персональных компьютерах, серверах и мобильных устройствах. В данной модели каждый файл имеет уникальное имя, сопровождается метаданными (информацией о файле) и занимает строго определенное место в иерархии [5].

Преимущества файловой системы в иерархическом формате заключаются в ее простоте и интуитивной понятности для большинства конечных пользователей, что не требует от них особых навыков для работы и настройки, а также возможность кроссплатформенной совместимости по причине высокой популярности. Кроме того, такой тип хранения данных является относительно экономически эффективным и безопасным [6].

К недостаткам файлового хранилища можно отнести:

- ограничения на размеры файлов в хранилище,
- ограничения на количество файлов,
- сложности с масштабированием системы.

Данная форма хранения предпочтительна для относительно небольших объемов данных и локального использования обычными пользователями. Организация общего доступа к содержимому файлового хранилища может быть реализована с использованием специализированных расширений, таких как Network File System (NFS) [7].

2. *Блочное хранилище* — система хранения информации, которая напоминает иерар-

хическую модель, но при этом файлы разбиваются на одинаковые по объему, непересекающиеся фрагменты или блоки [8]. В этой системе блоками являются отдельные кластеры, способные вмещать большие объемы данных.

Преимущества блочной системы заключаются в возможности разделения большого объема информации на блоки и обеспечении отдельного доступа к каждому из них [9].

Кроме того, блочные хранилища используют набор инструментов, которые обеспечивают высокую производительность системы: хост-адаптер шины разгружает процессор, освобождая его ресурсы для выполнения других задач [10]. Отсутствие сложных абстракций также способствует увеличению производительности и упрощает процесс масштабирования. Поэтому блочные системы хранения часто применяются в контексте гипервизоров и виртуализации, а также удобны для работы с реляционными базами данных [11].

К недостаткам блочной системы относятся сложность управления и необходимость узкой специализации для настройки, а также ограниченность объема хранения. Эти факторы также влияют на стоимость такой структуры, делая ее использование достаточно дорогим. Ограниченность метаданных² приводит к необходимости обработки вспомогательной информации на уровне приложений и баз данных.

3. *Объектная система хранения данных* — это тип хранилища, в котором данные различного формата и объема хранятся в виде объектов с метаданными, как правило, на облачном сервисе [12]. Оптимизация хранения метаданных достигается за счет соответствующей настройки.

К основным преимуществам объектного хранилища относятся [13]:

- легкая масштабируемость и практически неограниченный объем;
- отсутствие громоздкой структуры;
- высокая скорость поиска объектов;

² Amazon Web Services. What is block storage? URL: <https://aws.amazon.com/ru/what-is/block-storage/> (accessed: 25.11.2025).

- отсутствие строгих ограничений по формату и предобработке файлов;

- внутренние механизмы проверки целостности данных и другие функциональные возможности.

Недостатками объектного хранилища являются сложности при работе из-за частого отсутствия интерфейса или необходимости установки дополнительного программного обеспечения в правильной конфигурации, а также более высокая задержка доступа к данным из-за значительного объема метаданных по сравнению с блочной структурой [14].

Таким образом, объектная структура хранения лучше всего подходит для больших объемов неструктурированных данных, в то время как хранение реляционных баз данных в таком формате представляется крайне сложным и нецелесообразным.

1. Методы

Для реализации объектного доступа было разработано множество протоколов, среди которых наиболее популярными являются SOAP, S3 и OpenStack Swift [15]. Рассмотрим их особенности.

SOAP (Simple Object Access Protocol) — это протокол обмена сообщениями, используемый для передачи структурированной информации между веб-службами. Данный протокол предоставляет стандартизированный формат для коммуникации, включая использование XML для инкапсуляции сообщений. Он разработан с целью обеспечения взаимодействия между приложениями различных платформ и языков программирования через интернет. Для передачи документов SOAP может использовать различные протоколы, такие как FTP, HTTP, SMTP и POP3³.

S3 (Simple Storage Service) — протокол, предоставляющий механизмы управления доступом к данным, позволяя назначить различные

разрешения для отдельных объектов. Кроме того, S3 поддерживает управление жизненным циклом данных [16]. Этот протокол был представлен компанией Amazon в 2006 г. API (интерфейс прикладного программирования) доступен для всех сторонних разработчиков [17].

Некоторые уникальные особенности протокола S3⁴:

- элементы управления на уровне контейнера для управления версиями и истечения срока действия, которые применяются ко всем объектам в контейнере;

- копирование объектов — позволяет делать копии объектов на стороне сервера.

- анонимный доступ — возможность установить публичный доступ к объекту и обслуживать его по HTTP/HTTPS без аутентификации.

OpenStack Swift. OpenStack — это бесплатная платформа облачных вычислений с открытым исходным кодом, совместная разработка NASA и облачного провайдера Rackspace [18]. Swift — компонент объектного хранилища в OpenStack, действующий по одноименному протоколу⁵.

Протокол Swift управляется OpenStack Foundation, некоммерческой корпоративной организацией, созданной в сентябре 2012 г. для продвижения программного обеспечения OpenStack и его сообщества. К проекту присоединились более 500 компаний.

Уникальная особенность Swift API: создание неразмерного объекта. Swift — единственный протокол, в котором можно использовать кодирование «Chunked» (фрагментация) для загрузки объекта, размер которого заранее неизвестен. S3 требует для этого несколько запросов [19].

Аутентификация в Swift осуществляется через отдельный механизм, создающий «токен», который может передаваться для аутентификации запросов. OpenStack Swift в ECS поддерживает две версии аутентификации.

³ DreamFactory. Understanding SOAP security. URL: <https://blog.dreamfactory.com/understanding-soap-security> (accessed: 05.11.2025)

⁴ Old Hen Hut. S3 vs Swift. URL: <https://oldhenhut.wordpress.com/2016/05/31/s3-vs-swift/> (accessed: 05.11.2025).

⁵ OpenStack Foundation. The most widely deployed open source cloud software in the world. URL: <https://www.openstack.org/> (accessed: 01.12.2025).

На сегодняшний день протоколы S3 от Amazon и Swift от OpenStack — две наиболее популярные версии протоколов для облачных объектных хранилищ [20]. Они представлены в различных продуктах, предоставляющих интерфейсы взаимодействия с облачными сервисами⁶.

Для реализации сравнительной характеристики взаимодействия существующих хранилищ с имеющимися данными мы будем изучать протоколы S3 от Amazon и Swift от OpenStack для объектного типа хранения данных и предлагаемые в рамках этих протоколов продукты для облачного хранения данных.

В качестве продуктов для сравнения выберем три предложения с открытым исходным кодом: Ceph [21], MinIO [22], Openstack Swift⁷.

Ceph — комплексная система, поддерживает блочные, объектные и файловые данные. Основной отличительной чертой является высокая отказоустойчивость, которая хорошо зарекомендовала себя в применении для крупных инфраструктур [23].

MinIO — легкое, высокопроизводительное решение, оптимизировано под работу с данными через S3 API. Отлично подходит для контейнерных сред [24].

В отличие от других open-source решений MinIO изначально разработан как высокоскоростная, легковесная и масштабируемая система, оптимизированная именно для работы с большими объемами неструктурированных данных, что идеально соответствует природе медиаконтента, передаваемого в мессенджерах: изображений, видео-, аудиофайлов и документов [25].

OpenStack Swift — часть экосистемы OpenStack. Простая в развертывании, но менее производительна на мелких файлах. Лучше подходит для холодного хранения данных, то есть при редком использовании хранящихся файлов [26].

2. Результаты и обсуждение

2.1. Результаты анализа

Результаты сравнения после реализации представлены в таблице.

Опираясь на результаты представленной таблицы сравнения, можно сделать некоторые ключевые выводы о описанных продуктах хранения данных.

Для заявленной цели, поставленной в данной работе, наиболее приемлемым вариантом будет являться решение MinIO. Одним из главных преимуществ MinIO является его полная совместимость с API Amazon S3, который стал де-факто стандартом для объектного хранения. Это означает, что любое приложение, рассчитанное на работу с AWS S3, включая большинство современных платформ корпоративных коммуникаций, шлюзов безопасности и систем анализа данных, может быть интегрировано с MinIO без необходимости изменения кода. Такая совместимость значительно упрощает миграцию с облачных решений на локальную или гибридную инфраструктуру и позволяет организациям сохранять контроль над своими данными, соблюдая требования к их локализации и защите.

Архитектура MinIO построена на принципах горизонтального масштабирования и отказоустойчивости. Система легко формирует кластеры из множества узлов, автоматически распределяя данные с использованием технологии erasure coding, которая обеспечивает защиту от потери информации даже при выходе из строя нескольких дисков или серверов одновременно. При этом MinIO демонстрирует одну из самых высоких скоростей чтения и записи среди open-source решений, что критично для мессенджеров, где пользователи ожидают мгновенной загрузки медиафайлов. По сравнению с такими альтернативами, как OpenStack Swift или Ceph, MinIO требует меньше ресурсов для запуска, проще в настройке и не нуждается в сложной инфраструктуре управления, такой как мониторинговые узлы или специальные базы метаданных. Его можно быстро развернуть в виде контейнеров в Kubernetes, что делает его естественным выбором для организаций, использующих микросервисную архитектуру.

⁶ OpenSourceAlternative.to. Open source alternatives to Amazon S3. URL: <https://opensourcealternative.to/alternativesto/amazon-s3> (accessed: 03.11.2025).

⁷ MSP360. Open-source object storage solutions review. URL: <https://www.msp360.com/resources/blog/open-source-object-storage-vendors-comparison/> (accessed: 08.11.2025).

Сравнительный анализ предложений хранилищ объектного типа

Параметр	Ceph	MinIO	OpenStack Swift
1	2	3	4
Протокол	S3, Swift, RESTful	S3 API (полная совместимость)	OpenStack Swift API, S3-совместимый доступ
Производительность: <ul style="list-style-type: none"> Скорость загрузки (большие файлы) Скорость загрузки (мелкие объекты) Скорость скачивания (большие файлы) Скорость скачивания (мелкие объекты) 	<ul style="list-style-type: none"> 250–300 МБ/с (без аппаратного ускорения) 100–120 МБ/сек (ограничено оверхедом CRUSH и репликацией) 280–320 МБ/с (с кэшированием) 120–140 МБ/с 	<ul style="list-style-type: none"> 300–400+ МБ/с (в распред. режиме) 120–150 МБ/с 350–450+ МБ/с 160–200 МБ/с 	<ul style="list-style-type: none"> 180–220 МБ/с 70–100 МБ/с 200–250 МБ/с 80–110 МБ/с
Максимальный объем хранимых данных	Не ограничен (масштабируется горизонтально)	Не ограничен (распределенное хранение)	Не ограничен (масштабируется горизонтально)
Возможность работы кластера с опциями отказоустойчивости	Высокая отказоустойчивость: механизм репликации и авт. восстановление данных. Различные уровни отказоустойчивости	Поддержка отказоустойчивости через репликацию данных и механизм распределенного хранения	Обеспечивает отказоустойчивость через репликацию и возможные настройки различных уровней защиты данных
Репликация	Разные стратегии репликации (в т.ч. 3-way replication) и erasure coding для защиты данных	Стандартная репликация, erasure coding для защиты данных	Реализует репликацию объектов и поддерживает erasure coding для оптимизации хранения
Работа в контейнере	Поддерживает работу в контейнеризованных средах (в том числе Kubernetes) с помощью Rook и других интеграций	Оптимизирован для работы в контейнерах, легко разворачивается в Kubernetes и Docker	Может работать в контейнерах, требует больше усилий для интеграции по сравнению с MinIO
Клиентские приложения и монтирование в популярные ОС	CLI (radosgw), S3cmd, Rclone, FUSE-монтирование в Linux	S3cmd, MinIO Client (mc), Rclone, FUSE, Web UI, поддержка S3 SDK для всех языков	CLI, Swift CLI, Rclone, поддержка FUSE (через проекты сообщества)
Трудозатраты разработчика при подготовке проекта (в раб. ч.)	20	2,5	12

Источники: выполнено С.А. Тастом.

Comparative Analysis of Object Storage Solutions

Parameter	Ceph	MinIO	Open Stack Swift
1	2	3	4
Protocol	S3, Swift, RESTful	S3-compatible API	OpenStack Swift API, S3-compatible access
Performance: <ul style="list-style-type: none"> Upload speed (large files) Upload speed (small objects) Download speed (large files) Download speed (small objects) 	<ul style="list-style-type: none"> 250–300 MB/s (without hardware acceleration) 100–120 MB/s (limited by CRUSH and replication overhead) 280–320 MB/s (with caching) 120–140 MB/s 	<ul style="list-style-type: none"> 300–400+ MB/s (in distributed mode) 120–150 MB/s 350–450+ MB/s 160–200 MB/s 	<ul style="list-style-type: none"> 180–220 MB/s 70–100 MB/s 200–250 MB/s 80–110 MB/s
Maximum storage capacity	Not limited (horizontally scalable)	Not limited (distributed storage)	Not limited (horizontally scalable)
Cluster fault-tolerance capabilities	High fault tolerance: replication mechanism and automatic data recovery; various levels of fault tolerance	Fault-tolerance support through data replication and distributed storage mechanisms	Provides fault tolerance through replication and the ability to configure different levels of data protection
Replication	Various replication strategies, including 3-way replication, and erasure coding for data protection	Standard replication and erasure coding for data protection	Implements object replication and supports erasure coding for storage optimization
Containerized deployment	Supports operation in containerized environments, including Kubernetes, using Rook and other integrations	Optimized for containerized deployment; easily deployed in Kubernetes and Docker	Can run in containers, but requires more integration effort compared with MinIO
Client applications and mounting in popular OS	CLI (radosgw), s3cmd, Rclone, FUSE mounting in Linux	S3cmd, MinIO Client (mc), Rclone, FUSE, Web UI, S3 SDK support for major programming languages	CLI, Swift CLI, Rclone, FUSE support through community projects
Developer effort for project preparation, person-hours	20	2.5	12

Source: by S.A. Tast.

Кроме того, MinIO активно развивается сообществом и компанией-разработчиком, регулярно получает обновления и поддерживает современные функции, такие как уведомления о контейнерах, управление жизненным циклом, встроенная антивирусная проверка через интеграцию с ClamAV и поддержка машинного обучения через MinIO ML Gateway. Это позволяет не только хранить медиаданные, но и организовать их автоматическую обработку — например, анализ содержимого, тегирование на основе метаданных или удаление устаревших файлов согласно политикам хранения.

2.2. Обсуждение результатов

Проведенное исследование направлено на сравнительный анализ современных систем хранения данных с точки зрения их применимости в качестве хранилища медиафайлов для систем обмена сообщениями, с акцентом на требования к производительности, масштабируемости, отказоустойчивости и простоте эксплуатации. На основе анализа функциональных характеристик и архитектурных особенностей различных решений авторами было определено, что объектно-ориентированное хранилище, в частности MinIO, в наибольшей степени удовлетворяет совокупности предъявляемых требований и может рассматриваться как приоритетный вариант для внедрения в инфраструктуру корпоративных и отраслевых мессенджеров.

Ключевой результат работы заключается в обосновании выбора MinIO как оптимального решения, которое обеспечивает необходимую производительность, а также бесшовную интеграцию с широким спектром существующих приложений и сервисов без модификации их кода. Такая совместимость снижает порог внедрения для организаций, уже использующих облачные платформы, и открывает возможности для построения гибридных архитектур, в которых локальное объектное хранилище интегрируется с публичными облаками. В отличие от более тяжелых по инфраструктурным требованиям решений, таких как OpenStack Swift или Ceph, MinIO демонстрирует относительно низ-

кую ресурсозатратность и упрощенную конфигурацию, что делает его особенно привлекательным для микросервисных систем.

Научная новизна работы для отечественной и зарубежной науки проявляется, прежде всего, в комплексной оценке MinIO как элемента инфраструктуры систем обмена сообщениями с учетом специфики их нагрузочного профиля. Если в существующих исследованиях объектные хранилища преимущественно рассматриваются в контексте высокопроизводительных вычислений, аналитики больших данных или классических облачных платформ, то в данной работе акцент сделан на сценариях, где критичны одновременно высокая скорость работы с медиафайлами, простота масштабирования и соответствие требованиям по локализации и защите данных.

Представляется целесообразным проведение экспериментальных нагрузочных испытаний MinIO в реальных (или близких к реальным) условиях эксплуатации мессенджеров с различными профилями трафика (корпоративный, образовательный, массовый публичный сервис) для количественной оценки показателей задержек, пропускной способности и устойчивости к отказам. Отдельным перспективным направлением может стать разработка методик и рекомендаций по миграции существующих систем хранения, основанных на файловой или блочной модели к объектной архитектуре с учетом организационных, правовых и эксплуатационных ограничений конкретных отраслей.

Авторы видят также возможности для дальнейших исследований в области совмещения функций хранения и интеллектуальной обработки данных на уровне инфраструктуры. Также для изучения интересной представляется сфера различных возможностей, которые не включены в текущую конфигурацию хранилища: логирование операций с данными, ограниченные возможности условий фильтрации, отсутствие автоматического отслеживания доступа и прочее. Эти особенности могут быть необходимы для отдельных областей применения хранилища, поэтому необходим их тщательный анализ.

Заключение

Используя представленные результаты, можно сделать вывод о несомненных преимуществах объектного типа хранилища для решения поставленной задачи — безопасного и эффективного хранения мультимедийных данных в системах корпоративных коммуникаций. При анализе конкретных протоколов и решений с открытым исходным кодом были определены ключевые характеристики, влияющие на выбор заказчика. Среди хранилищ Ceph, MinIO и OpenStack Swift имеются различия, которые могут быть преимуществами и недостатками, в зависимости от особенностей файлов, инфраструктуры и прочих параметров. Выбранное нами решение — MinIO — сочетает в себе производительность, безопасность, масштабируемость и простоту внедрения, что делает его наиболее подходящим для хранения мультимедийных данных в системах корпоративных коммуникаций.

Список литературы

1. *Майстрович Т.В.* Электронный документ: основные характеристики и его место в системе обязательного экземпляра // Библиотекосведение. 2012. Т. 1. С. 43–46. <https://doi.org/10.25281/0869-608X-2012-0-1-43-46>
2. *Кварацхелия Л.Д.* Программа обеспечения автоматизации управления режимом доступа к ресурсам файловой системы // Евразийский союз учёных (ЕСУ). 2019. № 7 (64), ч. 6. С. 34. <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2019.6.64>
3. *Matick R.E.* Computer storage systems and technology. New York : Wiley, 1977. p. 549–551. ISBN 9780471576297
4. *Смирнов А.А., Бабкин А.А., Галеев В.В.* S3-хранилище против блочного и файлового хранилищ // Научный лидер. 2024. № 34 (184). С. 11–12. URL: https://scilead.ru/media/journal_pdf_184.pdf#page=11 (дата обращения: 27.11.2025).
5. *Kampfner R.R.* A hierarchical model of organizational control for the analysis of information systems requirements // Information Systems. 1987. Vol. 12. No. 3. P. 243–254. [https://doi.org/10.1016/0306-4379\(87\)90003-2](https://doi.org/10.1016/0306-4379(87)90003-2)
6. *Семеновкин Д.О., Марков А.К., Кравец А.Г.* Анализ иерархической модели организации файловых систем // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии : сб. трудов XX Международной научно-практической конференции. 01–10 окт. 2023, Махачкала. Москва : Ассоциация выпускников и сот-рудников ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2023. С. 240–243. EDN: BGGPCE
7. *Walker E.* A distributed file system for a wide-area high performance computing infrastructure // Proc. of the 2009 ACM/IEEE Conference on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC'09). 2009. P. 1–12. URL: <http://arxiv.org/pdf/1001.0196.pdf> (дата обращения: 01.11.2025).
8. *Алугев Е.А.* Преодоление проблем Big Data с помощью Data Lake // Big Data и анализ высокого уровня : сб. науч. статей XI Междунар. научно-практической конференции. Минск, 23–24 апреля. Минск : БГУИР, 2025. С. 66–73. ISBN 978-985-543-814-5
9. *Борискина А.Д., Ванисов П.С.* Облачное хранилище // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии, материалы Всероссийской научно-практической конференции Кемерово, 26 ноября 2021, Кемерово : КузГТУ, 2021. С. 60–61. ISBN 978-5-00137-271-4 EDN: ZZEEUW
10. *Захаров Д.С., Шпилевой Б.Д.* Файловое онлайн-хранилище для небольшой проектной организации // Инновационное развитие строительного комплекса региона, материалы II Всерос. научно-практической конференции, 15 окт. 2019, Михайловка — Волгоград. Волгоград : ВолгГТУ, 2020. С. 225–228. EDN: JBWWQH
11. *Кенжаев С.С., Рашидов А.Э.У.* Методы и алгоритмы хранения файлов для оптимального управления различными типами данных // Al-Fargʻoniy avlodlari. 2024. № 3. С. 82–92. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13954911>
12. *Самойлов Ю.Д.* Разработка серверной части, связанной с функциональными возможностями пользователя, для системы Request Helper: выпускная бакалаврская работа по направлению подготовки: 09.03.04 Программная инженерия. 2023. URL: <https://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vital:18526/SOURCE01> (дата обращения: 08.10.2025)
13. *Factor M., Meth K., Naor D., Rodeh O., Satran J.* Object storage: The future building block for storage systems // 2005 IEEE International Symposium on Mass Storage Systems and Technology. IEEE, 2005. P. 119–123. <https://doi.org/10.1109/LGDI.2005.1612479>
14. *Хомоненко А.Д., Абу-Хасан П.* О надежности и доступности объектных хранилищ данных // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2023. № S1 (35-1). С. 123–128. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-nadezhnosti-i-dostupnosti-obektnyh-hranilisch-dannyh/viewer> (accessed: 10.11.2025)
15. *Scope N., Rasin A., Lenard B., Wagner J.* Compliance and data lifecycle management in databases and backups // International Conference on Database and Expert Systems Applications. Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. P. 281–297. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39847-6_20

16. Akshay M.S., Mohan S., Kuri V., Sitaram D., Phalanchandra H.L. Efficient support of big data storage systems on the cloud // Proc. of the 7th IEEE/ACM International Conference on Cloud Computing. 2014. P. 1–8. URL: <http://arxiv.org/pdf/1411.7507.pdf> (accessed: 01.11.2025).
17. Зензин А.С. Проектирование и разработка горизонтально масштабируемой распределенной файловой системы: дипломный проект. Томск : НИ ТПУ, Институт кибернетики, кафедра ИПС, 2016. 105 с. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/28558> (дата обращения: 15.11.2025).
18. Teixeira J.A., Mian S.Q., Hytti U. Cooperation among competitors in the open-source arena: The case of OpenStack // Journal of Internet Services and Applications. 2016. Vol. 7. Article no. 8. URL: <http://arxiv.org/pdf/1612.09462.pdf> (accessed: 01.10.2025).
19. Rupperecht L., Zhang R., Owen B., Pietzuch P., Hildebrand D. SwiftAnalytics: Optimizing object storage for big data analytics // Proc. of IEEE International Conference on Cloud Engineering (IC2E). Vancouver, 2017. P. 245–251. <https://doi.org/10.1109/IC2E.2017.19>
20. Wang Y. An analysis of performance and potential of cloud computing and object storage : Doctoral dissertation, University of Auckland. Auckland, 2022. URL: <https://hdl.handle.net/2292/62217> (accessed: 08.10.2025).
21. Ильин В.Г., Цынгальев П.С., Боронников А.С. Применение Сeph в современных облачных инсталляциях // International Journal of Open Information Technologies. 2023. Т. 11. № 2. С. 44–50. ISSN 2307-8162
22. Ghemawat S., Gobioff H., Leung S.T. The Google File System // ACM SIGOPS Operating Systems Review. 2003. Vol. 37. No. 5. P. 29–43. <https://doi.org/10.1145/1165389.945450>
23. Weil S., Brandm S.A., Miller E.L., Long D.D.E., Maltzahn C. Ceph: A scalable, high-performance distributed file system // Proceedings of the 7th USENIX OSDI Conference. November 6–8, Seattle, WA, USA, 2006. P. 307–320. URL: https://www.usenix.org/events/osdi06/tech/full_papers/weil/weil_html (accessed: 10.11.2025).
24. Gadban F., Kunkel J. Analyzing the performance of the S3 object storage API for HPC workloads // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. No. 18. Article no. 8540. <https://doi.org/10.3390/app11188540>
25. Dimakis A.G., Godfrey P.B., Wu Y., Wainwright M. J., Ramchandran K. Network coding for distributed storage systems // IEEE Trans. Inf. Theory. 2010. Vol. 56. No. 9. P. 4539–4551. <https://doi.org/10.1109/TIT.2010.2054295> ISSN 0018-9448 / 1557-9654
26. Маркелов А. Openstack. Практическое знакомство с облачной операционной системой. Москва : ДМК Пресс, 2018. 306 с. ISBN 978-5-97060-652-0
- 43–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.25281/0869-608X-2012-0-1-43-46>
2. Kvaratskhelia LD. Program for ensuring automation of access control to file system re-sources. *Evraziyskiy Soyuz Uchenykh (ESU)*. 2019;7(64);34–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2019.6.64>
3. Matick RE. *Computer storage systems and technology*. New York: Wiley, 1977. p. 549–551. ISBN 9780471576297
4. Smirnov AA, Babkin AA, Galeev VV. S3 storage versus block and file storage. *Nauchnyy Lider*. 2024;34: 11–12. (In Russ.) Available from: https://scilead.ru/media/journal_pdf_184.pdf#page=11 (accessed: 27.11.2025)
5. Kampfner RR. A hierarchical model of organizational control for the analysis of information systems requirements. *Information Systems*. 1987;12(3):243–254. (In Russ.) [https://doi.org/10.1016/0306-4379\(87\)90003-2](https://doi.org/10.1016/0306-4379(87)90003-2)
6. Semenochkin DO, Markov AK, Kravets AG. Analysis of hierarchical model of file systems organization. *Innovative, Information and Communication Technologies: Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference; 2023; Moscow: Association of Alumni and Staff of the VVIA named after Professor N.E. Zhukovsky for the Preservation of Historical and Scientific Heritage of the VVIA named after Professor N.E. Zhukovsky; 2023.* p. 240–243. (In Russ.) EDN: BBGPCE
7. Walker E. A distributed file system for a wide-area high performance computing infrastructure. In *Proceedings of the 2009 ACM/IEEE Conference on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC'09)*. 2009; Seattle. p. 1–12. Available from: <http://arxiv.org/pdf/1001.0196.pdf> (accessed: 01.11.2025).
8. Aluev EA. Overcoming big data problems using data lake. *The Eleventh International Scientific and Practical Conference on BIG DATA and Advanced Analytics*, April, 23–24, Minsk; BGUIR. 2025. p. 66–73. (In Russ.) ISBN 978-985-543-814-5
9. Boriskina AD, Vanisov RS. Cloud storage. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference “Information and Telecommunication systems and Technologies.”* Kemerovo, November 26, 2021, Kemerovo: KuzGTU; 2021. p. 60–61. (In Russ.) ISBN 978-5-00137-271-4 EDN: ZZEEUW
10. Zakharov DS, Shpilevoy BD. File online storage for small project organization. *Information and Telecommunication Systems and Technologies: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Volgograd: VolgGTU; 2020. p. 225–228. (In Russ.) ISBN 978-5-9669-1981-8
11. Kenjaev S, Rashidov A. Methods and algorithms for file storage for optimal management of different types of data. *Al-Farg'oniyy avlodlari*. 2024;1(3):82–89. (In Russ.) <https://doi.org/10.5281/zenodo.13954911>
12. Samoylov YuD. *Development of server part related to user functionality for Request Helper system*.

References

1. Maistrovich TV. Electronic document: Main Characteristics and its Place in the System of Legal Deposit. *Russian Journal of Library Science*. 2012;(1):

[Bachelor's thesis in Software Engineering]. 2023. (In Russ.). Available from: <https://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vital:18526/SOURCE01> (accessed: 08.10.2025)

13. Factor M, Meth K, Naor D, Rodeh O, Satran J. Object storage: The future building block for storage systems. *2005 IEEE International Symposium on Mass Storage Systems and Technology*. 2005 20–24 Jun; Sardinia, Italy. IEEE; 2005. p. 119–123. <https://doi.org/10.1109/LGDI.2005.1612479>

14. Khomonenko AD, Abu-Khasan R. About the reliability and availability of object data storages. *Intellectual Technologies on Transport*. 2023;(S1):123–128. (In Russ.). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-nadezhnosti-i-dostupnosti-obektnyh-hranilisch-dannyh/viewer> (accessed: 10.11.2025)

15. Scope N, Rasin A, Lenard B, Wagner J. Compliance and Data Lifecycle Management in Databases and Backups. In: Strauss C, Amagasa T, Kotsis G, Tjoa AM, Khalil I, editors. *Database and Expert Systems Applications. DEXA 2023. Lecture Notes in Computer Science*. Cham: Springer; 2023. p. 281–297. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39847-6_20

16. Akshay MS, Mohan S, Kuri V, Sitaram D, Phalachandra HL. Efficient support of big data storage systems on the cloud. *Proceedings of the 7th IEEE/ACM International Conference on Cloud Computing*. 2014. p. 1–8. (In Russ.) Available from: <http://arxiv.org/pdf/1411.7507.pdf> (accessed: 01.11.2025).

17. Zenzin AS. *Design and development of horizontally scalable distributed file system*. Diploma project. Tomsk: NI TPU, Institute of Cybernetics, Department IPS; 2016. (In Russ.) Available from: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/28558> (accessed: 15.11.2025).

18. Teixeira JA, Mian SQ, Hytti U. Cooperation among competitors in the open-source arena: The case of

OpenStack. *Journal of Internet Services and Applications*. 2016;7:8. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1612.09462>

19. Rupperecht L, Zhang R, Owen B, Pietzuch P, Hildebrand D. SwiftAnalytics: Optimizing object storage for big data analytics. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Cloud Engineering (IC2E)*; 2017 Apr 1–7; Vancouver, BC, Canada. IEEE; 2017. p. 245–251. <https://doi.org/10.1109/IC2E.2017.19>

20. Wang Y. *An analysis of performance and potential of cloud computing and object storage*. Doctoral dissertation, University of Auckland. Auckland, 2022. Available from: <https://hdl.handle.net/2292/62217> (accessed: 08.10.2025)

21. Ilyn VG, Tsyngalev PS, Boronnikov AS. Using Ceph in modern cloud installations. *International Journal of Open Information Technologies*. 2023;11(2):44–50. (In Russ.) ISSN 2307-8162 EDN: ZOMMUR

22. Ghemawat S, Gobioff H, Leung ST. The Google file system. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*. 2003;37(5):29–43. <https://doi.org/10.1145/1165389.945450>

23. Weil S, Brandt SA, Miller EL, Long DDE, Maltzahn C. Ceph: A scalable, high-performance distributed file system. In: *Proceedings of the 7th USENIX OSDI Conference*. November 6–8, Seattle, WA, USA, 2006. p. 307–320. Available from: https://www.usenix.org/events/osdi06/tech/full_papers/weil/weil_html (accessed: 10.11.2025)

24. Gadban F, Kunkel J. Analyzing the performance of the S3 object storage API for HPC workloads. *Applied Sciences*, 2021;11(18):8540. <https://doi.org/10.3390/app11188540>

25. Dimakis AG, Godfrey PB, Wu Y, Wainwright MJ, Ramchandran K. Network coding for distributed storage systems. *IEEE Transactions on Information Theory* 2010; 56(9):4539–4551. <https://doi.org/10.1109/TIT.2010.2054295>

26. Markelov A. *OpenStack. Practical introduction to the cloud operating system*. Moscow: DMK Press; 2018. (In Russ.) ISBN 978-5-97060-652-0

Сведения об авторах

Таст Сергей Артурович, магистрант Центра заочного обучения по программам магистратуры, Московский технический университет связи и информатики, Российская Федерация, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8А; ORCID: 0009-0004-6244-654X; e-mail: s.a.tast@edu.mtuci.ru

Мосева Марина Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии, факультет информационных технологий, Московский технический университет связи и информатики, Российская Федерация, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8А; eLIBRARI SPIN-код: 1313-0436; ORCID: 0000-0002-9778-124X; e-mail: m.s.moseva@mtuci.ru

About the authors

Sergey A. Tast, Master's student at the Center for Distance Learning for Master's Degree Programs at the Moscow Technical University of Communications and Informatics, 8A Aviamotornaya St, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-6244-654X; e-mail: s.a.tast@edu.mtuci.ru

Marina S. Moseva, PhD in Technical Sciences; Associate Professor of the Department of Software Engineering, Faculty of Information Technology, Moscow Technical University of Communications and Informatics, 8A Aviamotornaya St, Moscow, Russian Federation; eLIBRARI SPIN-code: 1313-0436; ORCID: 0000-0002-9778-124X; e-mail: m.s.moseva@mtuci.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-2-203-214

EDN: KZRMZX

Научная статья / Research article

Методика прогнозирования ресурса силовых модулей преобразователей частоты на основе анализа эксплуатационных данных

Н.В. Бунин^{ID}✉, А.Ю. Сальников^{ID}

Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации,

Москва, Российская Федерация

✉ cool.buninnikita@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 19 октября 2025 г.

Доработана: 26 января 2026 г.

Принята к публикации: 5 февраля 2026 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта

При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Аннотация. В условиях цифровой трансформации промышленности переход от планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию выступает ключевым фактором повышения надежности электроприводов. Промышленные преобразователи частоты (ПЧ) являются критически важными узлами технологических цепочек, однако существующие регламенты их обслуживания часто экономически неэффективны и не предотвращают внезапные отказы силовой электроники. Цель исследования — разработка методики оценки остаточного полезного ресурса (RUL) критически важных компонентов промышленных преобразователей частоты (IGBT-модулей и конденсаторов звена постоянного тока) на основе гибридного анализа эксплуатационных данных (реального времени). Проведено комплексирование физических моделей отказов и алгоритмов глубокого обучения (CNN-LSTM). Для преодоления ограничений закрытой архитектуры промышленных контроллеров предложена двухуровневая система сбора данных на принципах граничных вычислений (Edge Computing). Диагностика выполнена путем косвенной оценки дрейфа напряжения насыщения ($V_{CE(ON)}$) и эквивалентного последовательного сопротивления (ESR) через анализ спектральных искажений выходного тока и пульсаций напряжения DC-звена. Сформирована матрица классификации технических состояний преобразователя с количественными пороговыми значениями деградации. Численный эксперимент на массиве исторических данных с предприятия химической промышленности показал, что предложенная гибридная модель снижает ошибку прогнозирования RUL до 12–15 % по сравнению с традиционными методами экстраполяции, позволяя выявлять предаварийные состояния за 160–200 часов до отказа. Внедрение разработанной модели даст возможность полноценного перехода к стратегии обслуживания по фактическому состоянию, повышая эффективность мероприятий, связанных с техническим обслуживанием и ремонтом.

Ключевые слова: техническое обслуживание и ремонт, ТОиР, прогнозирование отказов, предиктивное обслуживание, автоматизация, диагностика

Вклад авторов

Бунин Н.В. — сбор и обработка материалов, анализ полученных данных, написание текста, визуализация; Сальников А.Ю. — концепция исследования, валидация. Оба автора ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

© Бунин Н.В., Сальников А.Ю., 2026

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Финансирование

Исследование частично финансировалось предприятиями крупного химического холдинга, компании предоставили данные технологических карт, выгрузки из АСУТП, перечень и паспорта преобразовательной техники, технические регламенты и прочее; в связи с конфиденциальностью данной информации название предприятий не раскрывается.

Для цитирования

Бунин Н.В., Сальников А.Ю. Методика прогнозирования ресурса силовых модулей преобразователей частоты на основе анализа эксплуатационных данных // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 2. С. 203–214. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-203-214> EDN: KZRMZX

A Method for Predicting the Lifetime of Power Modules of Power Converters Based on the Analysis of Operational Data

Nikita V. Bunin[✉], Aleksandr Yu. Salnikov^{ORCID}

Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russian Federation

✉ cool.buninnikita@yandex.ru

Article history

Received: October 19, 2025

Revised: January 26, 2026

Accepted: February 5, 2026

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies.

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability

All data obtained during this study are included in the published article.

Abstract. In the context of industrial digital transformation, the transition from scheduled preventive maintenance to condition-based maintenance is a key factor in increasing the reliability of electric drives. Industrial frequency converters (FCs) are critical components of process chains; however, existing maintenance procedures are often economically inefficient and do not prevent sudden failures of power electronics. The aim of this study is to develop a methodology for assessing the remaining useful life (RUL) of critical components of industrial frequency converters, namely IGBT modules and DC-link capacitors, based on a hybrid analysis of real-time operational data. The authors combine physical failure models with deep learning algorithms (CNN–LSTM). To overcome the limitations of the closed architecture of industrial controllers, a two-tier data collection system based on edge computing principles is proposed. Diagnostics are performed by indirectly assessing the saturation voltage drift ($V_{CE(ON)}$) and equivalent series resistance (ESR) through an analysis of spectral distortions in the output current and DC link voltage ripple. A converter technical condition classification matrix with quantitative degradation thresholds has been developed. A numerical experiment based on a historical dataset from a chemical industry plant showed that the proposed hybrid model reduces the RUL prediction error to 12–15% compared to traditional extrapolation methods, enabling the identification of pre-failure conditions 160–200 hours before failure. The implementation of the developed model will enable a full transition to condition-based maintenance, thereby improving the efficiency of maintenance and repair activities.

Keywords: maintenance and repair (MRO), failure prediction, predictive maintenance, automation, diagnostic

Authors' contribution

Bunin N.V. — collection and processing of materials, analysis of the obtained data, writing, visualization; Salnikov A.Yu. — research concept, validation. Both of the authors read and approved the final version of the article.

Funding

The study was partially funded by enterprises belonging to a large chemical holding. The participating companies provided process flow sheet data, data exports from automated process control systems (APCS), lists and technical data sheets for converter equipment, technical regulations, and other materials. Due to the confidentiality of this information, the names of the enterprises are not disclosed.

For citation

Bunin NV, Salnikov AYu. A method for predicting the lifetime of power modules of power converters based on the analysis of operational data. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(2):203–214. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-203-214> EDN: KZRMZX

Введение

Объектом исследования являются промышленные преобразователи частоты (ПЧ), выступающие ключевым элементом электропривода в ответственных технологических процессах (нефтегазовая отрасль, металлургия, химическая промышленность и др.). В условиях цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса, принятой распоряжением Правительства Российской Федерации от 12 марта 2024 г. № 581-р, возрастает актуальность оценки состояния промышленного оборудования в рамках его эксплуатации. Внезапные отказы ПЧ приводят не только к простоему оборудования, но и к значительным финансовым потерям. Как показано в [1], внедрение стратегий предиктивного обслуживания на базе искусственного интеллекта способно обеспечить высокий возврат инвестиций (ROI) за счет сокращения аварийных простоев и оптимизации логистики запчастей. Однако на практике реализация таких стратегий сталкивается с ограничениями архитектуры промышленных систем.

Анализ современных публикаций выявляет несколько доминирующих подходов к диагностике систем электропривода, каждый из которых имеет существенные ограничения применительно к промышленным ПЧ, перечисленные ниже.

1. *Диагностика систем электропривода.* Значительный пласт работ посвящен диагностике «вращающегося оборудования» — подшипниковых узлов, статорных обмоток, механических передач. Так, в [2] предлагают технологию «Electric Motor Scan» для электродвигателей, а C.D. Constantino-Robles и др. [3] детально рассматривают диагностику компонентов трансмиссии ветрогенераторов. Аналогично C.L. Tolbert [4] описывает использование данных ПЧ для неразрушающего контроля механических систем. Эти методы эффективно защищают исполнительные механизмы, но оставляют саму силовую электронику (инвертор/выпрямитель) «черным ящиком», не оценивая деградацию ее критических компонентов.

2. *Физические модели надежности.* Фундаментальные работы К. Ма и др. [5] и S. Reughani и др. (2020) [6] заложили основу проектирования надежности на базе физики отказов. Данные подходы идеальны для этапа проектирования, но сложно применимы для диагностики эксплуатируемого оборудования (в условиях промышленного предприятия), так как требуют точных параметров материалов и геометрии модулей, которые являются закрытой информацией производителей.

3. *Методы на основе искусственного интеллекта (AI) и глубокого обучения (DL).* S. Konkimalla [7] рассматривает применение AI для диагностики асинхронных двигателей, батарей и силовой электроники электромобилей, а Y. Jian и др. [8] и Z. Zhang, X. Chen [9] предлагают алгоритмы CNN-LSTM и Pathformer сетей для оценки старения конденсаторов и IGBT-транзисторов соответственно. Большинство этих моделей требуют высокочастотных данных (мгновенные значения токов/напряжений), которые невозможно передать через стандартные промышленные интерфейсы (Modbus/Profinet) обычных ПЧ без установки дорогостоящего дополнительного оборудования.

4. *Гибридные и системные подходы.* H. Taoufyq и др. [10] и B. Muniandi и др. [11] в своих обзорах указывают на перспективность интеграции IoT и ML. Y. Fassi и др. [12] и A. Ozdagli и X. Koutsoukos [13] подчеркивают необходимость внедрения физических знаний в модели машинного обучения (Physics-Informed ML) для повышения их интерпретируемости. Работы [14–15] подтверждают тренд на использование встроенных данных для электродвигателей и ПЧ соответственно. Несмотря на обилие методов, в литературе слабо представлены решения, позволяющие диагностировать внутренние компоненты (IGBT, DC-конденсаторы) закрытых промышленных ПЧ, используя только низкочастотную телеметрию, доступную штатно.

На основании проведенного анализа установлено, что в существующих литературных источниках отсутствует комплексная методика, позволяющая оценивать остаточный ресурс

силовых модулей промышленных ПЧ в режиме реального времени без вмешательства в их аппаратную часть и без использования высокочастотных осциллографов (устройств сбора данных). Существует разрыв между точными лабораторными (теоретическими) методами (требующими сложного оборудования) и доступными промышленными данными (имеющими низкую частоту дискретизации).

Цель исследования — разработка методики предиктивной оценки остаточного ресурса (RUL) силовых компонентов ПЧ на основе гибридного анализа эксплуатационных данных, получаемых через штатные промышленные протоколы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) провести анализ физики отказов IGBT-модулей инвертора и конденсаторов постоянного тока для определения диагностических признаков, наблюдаемых через косвенные параметры: температура, пульсации напряжения, токовые нагрузки;

2) разработать алгоритмы предобработки низкочастотных временных рядов для выделения скрытых трендов деградации (снижения эксплуатационного ресурса);

3) создать гибридную модель прогнозирования, объединяющую физические закономерности старения с методами глубокого обучения (на примере LSTM/RNN);

4) предложить архитектуру системы мониторинга, интегрируемую в существующий IT-ландшафт предприятия;

5) выполнить экспериментальную валидацию методики на наборе данных для подтверждения ее эффективности.

1. Материалы и методы

1.1. Анализ стратегий технического обслуживания силовой электроники

В современной промышленности эксплуатация преобразователей частоты (ПЧ) традиционно базируется на двух основных подходах: реактивном и превентивном. Реактивная стратегия подразумевает эксплуатацию оборудова-

ния до момента отказа. В условиях отсутствия локальных нормативных документов и специализированных компетенций у персонала цехов промышленных площадок данный подход является доминирующим на многих предприятиях. Однако для критически важного оборудования он экономически неэффективен, так как внезапные отказы силовой электроники приводят к длительным простоям и каскадным повреждениям сопряженных механизмов.

Превентивная стратегия (планово-предупредительный ремонт) основывается на регламентной замене компонентов (вентиляторов, силовых модулей, конденсаторов и прочих компонентов ПЧ) через фиксированные интервалы времени, независимо от их фактического состояния. Главным недостатком этого метода является «избыточное обслуживание», когда замене подлежат исправные узлы с неисчерпанным ресурсом, либо, наоборот, деградация происходит быстрее регламентного срока из-за тяжелых режимов работы.

Сложность внутренней архитектуры современных ПЧ и высокие требования к квалификации персонала вынуждают предприятия передавать функции обслуживания на аутсорсинг сервисным организациям. Это создает зависимость от внешних подрядчиков и не позволяет оперативно оценивать риски отказа в режиме реального времени. Решением данных проблем является переход к обслуживанию по фактическому состоянию (Condition-Based Maintenance, CBM) и предиктивной аналитике. Использование ПЧ в качестве интеллектуального устройства позволяет непрерывно мониторить состояние ПЧ без необходимости проведения ежедневных осмотров, что минимизирует влияние человеческого фактора и оптимизирует затраты на ТОиР.

1.2. Анализ механизмов отказов и выбор диагностических признаков

1.2.1. Физика деградации силовых полупроводниковых модулей

Надежность частотно-регулируемого привода (в частности преобразователей частоты)

критически зависит от ресурса силовых IGBT-модулей, которые подвергаются наиболее интенсивным термомеханическим нагрузкам. В условиях циклической нагрузки, характерной для промышленных приводов с переменным профилем нагрузки, основным триггером отказа является несоответствие коэффициентов теплового расширения (СТЕ) материалов многослойной структуры модуля (кремниевый чип, припой, медное основание, керамическая подложка).

Механизм деградации протекает в двух основных направлениях.

1. Отслоение соединительных проводников: алюминиевые проводники, соединяющие эмиттер чипа с терминалами, испытывают деформацию сдвига при колебаниях температуры перехода (T_j). Накопление усталостных напряжений приводит к появлению микротрещин и последующему отрыву проводников. Это вызывает перераспределение тока на оставшиеся проводники, ускоряя их деградацию лавинообразно.

2. Усталость паяного слоя: деградация припоя между чипом и подложкой приводит к увеличению теплового сопротивления (R_{th}), что вызывает рост средней температуры перехода и ускоряет старение.

1.2.2. Обоснование выбора диагностических параметров

Для реализации стратегии обслуживания по состоянию необходимо выделить электрические параметры, коррелирующие с физической деградацией. Исследования показывают, что наиболее чувствительным параметром к отслоению проводников является напряжение насыщения коллектор-эмиттер в открытом состоянии ($V_{CE(ON)}$) [16].

Физическая зависимость описывается следующим образом: по мере отрыва проводников увеличивается омическое сопротивление контакта, что при фиксированном токе нагрузки (I_c) ведет к росту падения напряжения $V_{CE(ON)}$. Критическим пороговым значением принято считать увеличение $V_{CE(ON)}$ на 15–20 % от номинального значения.

Увеличенное падение напряжения на одном из ключей создает асимметрию в выходном напряжении инвертора. Это приводит к появлению постоянной составляющей (DC) и четных гармоник в спектре фазных токов двигателя, которые отсутствуют в идеальном состоянии. Анализируя спектр тока (MCSA), возможно вычислить отклонение V_{ce} без установки щупов на сам силовой модуль.

1.2.3. Деградация звена постоянного тока

Вторым лимитирующим компонентом являются электролитические конденсаторы DC-звена. Основной механизм их отказа — испарение электролита через уплотнения вследствие теплового старения, что приводит к уменьшению емкости и росту эквивалентного последовательного сопротивления (ESR). Мониторинг пульсаций напряжения в звене постоянного тока позволяет косвенно оценить изменение ESR без разбора устройства. Также большинство современных преобразователей частоты (например, ABB ACS880) имеют внутренние алгоритмы расчета ESR, впоследствии способные выдавать это значение по запросу в вышестоящую систему.

В соответствии с общепринятыми стандартами надежности силовой электроники, критерием исчерпания ресурса электролитических конденсаторов принято считать снижение емкости на 20 % или увеличение ESR на 100 % (в 2 раза) относительно начальных значений.

Таким образом, для построения предиктивной модели в качестве входных векторов данных необходимо использовать временные ряды токов фаз (I_a , I_b , I_c), напряжения звена постоянного тока (V_{dc}) и температуры модуля, доступные через встроенные датчики ПЧ, что включает необходимость установки внешней инвазивной аппаратуры [17].

1.3. Алгоритм и методика прогнозирования остаточного ресурса

1.3.1. Архитектура системы мониторинга

Реализация алгоритмов машинного обучения непосредственно на встроенном контроле

лере ПЧ ограничена закрытостью проприетарного программного обеспечения производителей и недостаточной вычислительной мощностью штатных микропроцессоров для выполнения ресурсоемких операций. В связи с этим предложена двухуровневая архитектура системы мониторинга (рис. 1), где ПЧ выполняет функцию интеллектуального устройства, а аналитическая обработка вынесена на внешний вычислительный узел (Edge Gateway/Server). Такой подход обеспечивает универсальность

решения и возможность его масштабирования на парк оборудования различных вендоров без вмешательства во внутреннюю схемотехнику устройств.

Разработанная методика базируется на функциональной модели стандарта ISO 13374, регламентирующего архитектуру систем диагностики и прогнозирования [18]. Процесс обработки данных разделен на три последовательных этапа: сбор данных, выделение признаков и прогностическая оценка.

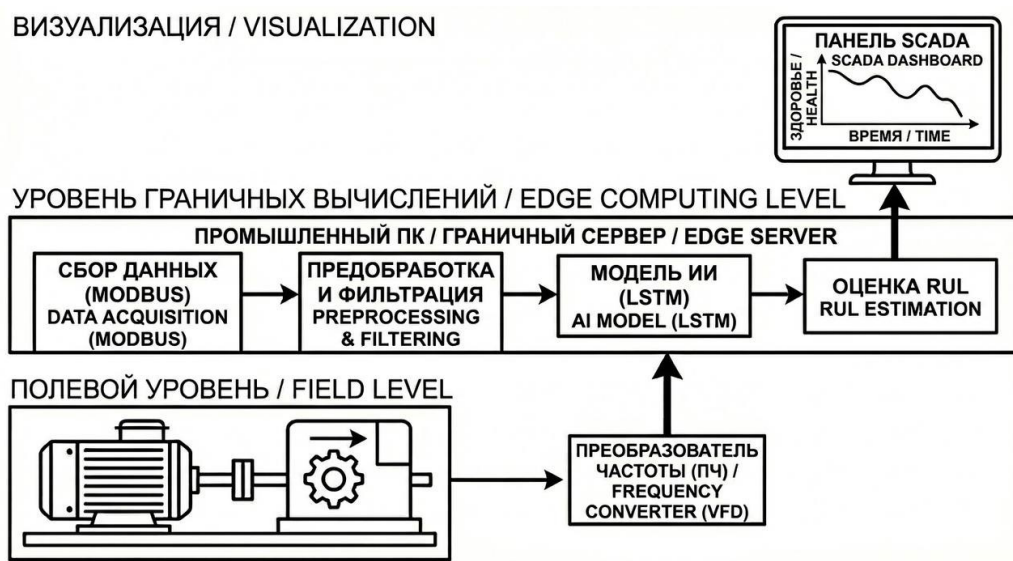


Рис. 1. Архитектура системы мониторинга
Источник: выполнено Н.В. Буниным.

Figure 1. Monitoring system architecture
Source: by N.V. Bunin.

В качестве входного вектора данных $X(t)$ используются временные ряды, получаемые с частотой дискретизации f_s непосредственно с контроллера ПЧ через промышленные протоколы (Modbus TCP/Profinet/OPC UA или по аналогу) без использования дополнительных датчиков:

$$X(t) = \{i_{a,b,c}(t), u_{dc}(t), T_{hs}(t), w(t)\},$$

где i — фазные токи; u_{dc} — напряжение звена постоянного тока; T_{hs} — температура радиатора; w — выходная частота.

1.3.2. Предварительная обработка и выделение диагностических признаков

Сырые данные подвергаются предварительной обработке для устранения высокочастотного шума и выбросов, вызванных переходными процессами (пуски, набросы нагрузки). Для этого применяется метод экспоненциального сглаживания:

$$\hat{x}_t = \alpha * x_t + (1 - \alpha) * \hat{x}_{t-1},$$

где \hat{x}_t — сглаженное значение, а α — коэффициент сглаживания ($0 < \alpha < 1$).

Для оценки состояния IGBT-модулей в качестве ключевого индикатора «здоровья» используется дрейф напряжения насыщения $V_{CE(ON)}$. Поскольку прямое измерение V_{ce} в процессе ШИМ-модуляции затруднено, применяется косвенный метод оценки через анализ спектральных гармоник выходного тока или использование встроенных драйверов с функцией мониторинга V_{ce} в моменты проводящего состояния ключа.

Для конденсаторов звена постоянного тока диагностическим признаком является амплитуда пульсаций напряжения ΔU_{dc} , которая линейно коррелирует с ростом ESR (эквивалентного последовательного сопротивления).

Полное сопротивление (импеданс Z_c) конденсатора складывается из его емкостного сопротивления (X_c) и активного сопротивления (ESR). Пульсации напряжения в звене постоянного тока (ΔU_{dc}) вызываются протеканием через конденсатор переменной составляющей тока (I_{ripple}). Связь описывается формулой

$$Z_c = \frac{\Delta U_{dc}}{I_{ripple}} = \sqrt{ESR^2 + X_c^2}.$$

Поскольку на высоких частотах (частота ШИМ, кГц) емкостное сопротивление $X_c = \frac{1}{2\pi f C}$ стремится к нулю, импеданс конденсатора становится практически равным ESR. Следовательно, амплитуда высокочастотных пульсаций напряжения становится прямо пропорциональной ESR.

1.3.3. Модель прогнозирования RUL

Прогнозирование остаточного ресурса формулируется как задача регрессии временного ряда деградации до момента пересечения заданного порога отказа. Для аппроксимации тренда деградации предлагается использовать гибридную модель, объединяющую физические закономерности и методы машинного обучения. В качестве базовой модели деградации используется экспоненциальная зависимость, характерная для развития усталостных трещин:

$$HI(t) = HI_0 \cdot e^{\beta t},$$

где $HI(t)$ — текущее значение индикатора здоровья; β — скорость деградации.

Однако, учитывая стохастический характер нагрузки в реальных условиях, детерминированная модель дополняется алгоритмом на базе нейронной сети LSTM (Long Short-Term Memory), способной улавливать нелинейные временные зависимости в рядах данных. Остаточный ресурс (RUL) в момент времени t_k определяется как

$$RUL(t_k) = t_{EOL} - t_k,$$

где t_{EOL} — прогнозируемое время, когда $HI(t)$ достигнет критического порога $HI_{threshold}$. Для IGBT модулей в качестве $HI_{threshold}$ принято увеличение $V_{CE(ON)}$ на 15–20 % от номинального значения, что свидетельствует о необратимом разрушении паяных соединений.

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет перейти от экспертной оценки состояния к количественному расчету времени до отказа, минимизируя влияние человеческого фактора.

2. Результаты

2.1. Численный эксперимент

2.1.1. Формирование обучающей выборки и настройка модели

Для верификации предложенной методики использовался массив исторических данных (Log-файлы), выгруженных из системы АСУТП промышленного предприятия по производству минеральных удобрений за период 12 месяцев. Входной вектор включал временные ряды выходных токов (I_{rms}), напряжения звена постоянного тока (V_{dc}) и температуры радиатора преобразователя частоты мощностью 75 кВт.

Для имитации процесса деградации использовались эталонные наборы данных.

1. Для IGBT-модулей: набор данных NASA PCoE (IGBT Accelerated Aging Data Set), содержащий записи переходных процессов при термоциклировании до момента отказа (пробой затвора/отрыв проводников).

2. Для конденсаторов: экспериментальные данные деградации электролитических конденсаторов, полученные в ходе испытаний на термическое старение при температурах 105 °С, описанные в [19]

Поскольку оригинальные лабораторные датасеты получены с помощью высокоскоростных осциллографов (частота дискретизации $f_s > 10$ кГц), что недостижимо для стандартных промышленных сетей (Modbus TCP/RTU), была проведена процедура децимации (прореживания) данных. Временные ряды были усреднены и дискретизированы с частотой $f_s = 20$ Гц (соответствует дискретности данных, хранимых в архиве АСУТП). Это позволило проверить гипотезу о возможности детектирования трендов старения (V_{ce} , ESR) на основе низкочастотной телеметрии, доступной из внутренней памяти преобразователя частоты или сервера АСУТП, без применения дополнительного диагностического оборудования.

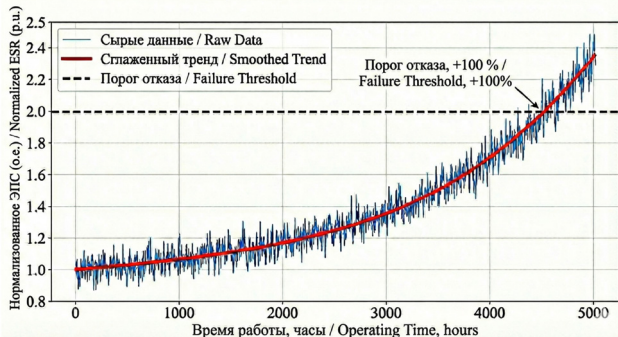


Рис. 2. Динамика изменения напряжения насыщения IGBT: исходный сигнал (синий) и сглаженный тренд (красный) относительно порогового значения
Источник: выполнено Н.В. Буниным.

Figure 2. Dynamics of IGBT saturation voltage degradation: original signal (blue) and smoothed trend (red) relative to the threshold value
Source: by N.V. Bunin.

Сформированный массив данных был разделен на обучающую (70 %), валидационную (15 %) и тестовую (15 %) выборки. Входной вектор модели $X(t)$ формировался методом скользящего окна шириной $W = 50$ отсчетов (5 с реального времени):

Ввиду дисбаланса классов (преобладание данных нормального режима над аварийными) была применена процедура аугментации данных с генерацией синтетических аномалий, имитирующих дрейф V_{ce} (для IGBT) (рис. 2) и рост ESR (для конденсаторов) (рис. 3) на основе физических моделей отказов:

- для модели деградации IGBT к базовому значению напряжения добавлялся экспоненциальный тренд дрейфа напряжения насыщения $\Delta V_{ce}(t)$, характерный для накопления усталости паяного слоя:

$$V_{ce}(t) = V_{ce,0} + \alpha e^{\beta t} + \xi(t),$$

где $\xi(t)$ — белый шум, имитирующий погрешность датчиков; $V_{ce,0}$ — порог отказа;

- для модели деградации конденсатора инжектировался тренд роста эквивалентного последовательного сопротивления (ESR), соответствующий закону высыхания электролита.

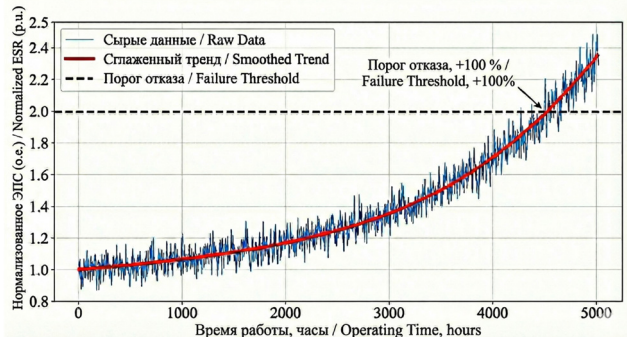


Рис. 3. Динамика роста эквивалентного последовательного сопротивления (ESR) конденсатора: исходный сигнал (синий) и сглаженный тренд (красный) относительно порогового значения
Источник: выполнено Н.В. Буниным.

Figure 3. Dynamics of capacitor ESR increase: original signal (blue) and aging trend (red) relative to the threshold value
Source: by N.V. Bunin.

$$X(t) = \{I_{rms}, U_{dc}, T_{hs}, f_{out}, \Delta U_{ripple}\}_{t-W}^t,$$

где I_{rms}, U_{dc}, T_{hs} — прямые измерения тока, напряжения и температуры; f_{out} — выходная частота (определяет режим работы); ΔU_{ripple} — амплитуда пульсаций напряжения в звене пос-

тоянного тока, выделенная из сигнала U_{dc} путем высокочастотной фильтрации.

Архитектура модели включала:

- слой 1D-CNN (128 фильтров) для извлечения локальных признаков из временных рядов токов и пульсаций;
- два слоя LSTM (по 64 нейрона) для выявления долговременных зависимостей деградации;
- полносвязный слой (Dense) для регрессии значения RUL.

2.1.2. Классификация технического состояния

На основе анализа дрейфа диагностических признаков относительно базовой линии была сформирована матрица состояний преобразователя. Для унификации диагностической

матрицы введен обобщенный (нормированный) параметр отклонения δ . Поскольку физические критерии отказа для критических компонентов различаются по абсолютной величине — для IGBT-модулей критическим считается рост напряжения насыщения V_{ce} на 20 % [20], а для конденсаторов звена постоянного тока окончанием ресурса является увеличение ESR на 100 % (в 2 раза) — в методике применена процедура масштабирования признаков.

Для конденсаторов физическое отклонение ESR нормируется с коэффициентом $k = 0,2$. Это позволяет использовать единую шкалу оценки (табл.), где значению $\delta = 20\%$ соответствует полное исчерпание ресурса любого из контролируемых узлов.

Критерии оценки технического состояния силового каскада ПЧ
Criteria for assessing the technical condition of the power stage of a frequency converter

Класс состояния / Condition Class	Диапазон отклонения признака / Parameter Deviation Range (ΔHI)	Характеристика режима / Operating Mode Characteristics	Рекомендуемое действие / Recommended Action
I. Норма / Normal	$\delta \leq 5\%$	Штатная эксплуатация / Normal operation	Мониторинг без вмешательства / Monitoring without intervention
II. Дegradация / Degradation	$5\% < \delta \leq 12\%$	Начальный износ / Initial wear (Onset of degradation)	Планирование ТО в ближайшее «окно» / Maintenance planning for the next available window
III. Преаварийный / Pre-fault (Alert)	$12\% < \delta \leq 18\%$	Развитый дефект / Developed defect (Advanced fault)	Снижение нагрузки, заказ ЗИП / Load reduction, ordering spare parts (SPARE)
IV. Критический / Critical	$\delta > 18\%$	Исчерпание ресурса / End of life (Resource depletion)	Аварийный останов, немедленная замена / Emergency shutdown, immediate replacement

Источник: выполнено Н.В. Буниным / Source: by N.V. Bunin.

2.1.3. Оценка точности прогнозирования RUL

Для оценки эффективности предложенного гибридного алгоритма (CNN-LSTM) было проведено сравнение с традиционным методом экстраполяции на основе закона Аррениуса (используемым в статических расчетах надежности). В качестве метрик точности использовались корень из среднеквадратичной ошибки (RMSE) и средняя абсолютная ошибка (MAE) прогноза остаточного ресурса в часах.

Результаты моделирования показали, что при горизонте прогнозирования 30 дней погрешность предложенной методики не превышает 12–15 %, в то время как традиционный метод дает ошибку до 30–40 % (рис. 4) из-за неучета динамики реального профиля нагрузки.

Алгоритм продемонстрировал высокую чувствительность к ранним признакам старения:

- 1) для IGBT-модулей: тренд роста V_{ce} был идентифицирован за 160 ч до фактического отказа;

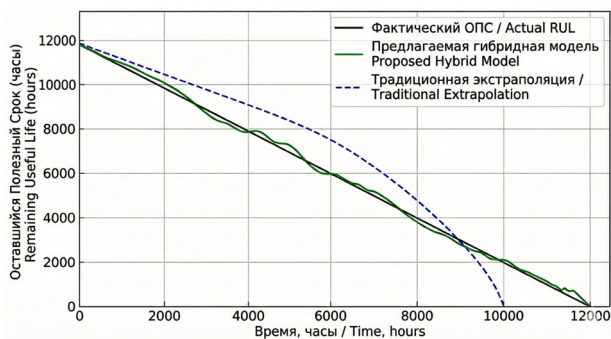


Рис. 4. Сравнение точности прогнозирования остаточного ресурса: предложенная гибридная модель (зеленый) против традиционного метода экстраполяции (синий)
Источник: выполнено Н.В. Буниным.

Figure 4. Comparison of the remaining life prediction accuracy: the proposed hybrid model (green) versus the traditional extrapolation method (blue)

Source: by N.V. Bunin.

2) для конденсаторов: необратимый рост эквивалентного последовательного сопротивления (ESR) был детектирован за 200 ч до достижения критического порога (+100 %).

3. Практическая значимость

Экономическая целесообразность перехода от реактивного обслуживания к предиктивному оценивается через снижение совокупной стоимости владения (Total Cost of Ownership, TCO). Анализ структуры эксплуатационных затрат показывает, что в традиционной модели аутсорсинга значительную долю составляют не только прямые расходы на оплату услуг подрядчиков, но и косвенные потери, связанные с латентностью реагирования (временем ожидания сервисной бригады) и административными издержками на сопровождение контрактов.

Согласно индустриальным исследованиям, внедрение систем предиктивной аналитики позволяет трансформировать структуру затрат следующим образом:

1) сокращение бюджета на ТОиР составляет 18–25 % за счет исключения «лишних» операций с исправным оборудованием (устранение избыточного обслуживания) и перехода к ремонтам «точно вовремя»;

2) раннее обнаружение дефектов позволяет сократить незапланированные простои на 30–50 %, что для непрерывного производственного цикла эквивалентно сохранению сотен часов продуктивного времени ежегодно (сокращение простоя) [21];

3) оптимизация складских запасов: точный прогноз замены компонентов позволяет сократить складские запасы ЗИП на 10–20 %, исключая необходимость хранения дорогостоящих узлов «на всякий случай» [22].

Внедрение методики не предполагает полной замены человека алгоритмами, а меняет парадигму работы электротехнического персонала предприятия. ПЧ, оснащенный системой диагностики, выступает в роли системы поддержки принятия решений. Это позволяет сместить фокус работы штатных специалистов с рутинных осмотров на высококвалифицированную аналитику и точечное устранение неисправностей. Такой подход обеспечивает:

– *снижение MTTR (Mean Time To Repair)*: собственный персонал, получая остаточную оценку ресурса преобразователя, может предпринимать превентивные меры по выводу позиции из эксплуатации (предусмотрев заблаговременно изменение технологической карты и оформление заказ-наряда на замену);

– *технологический суверенитет*: снижение критической зависимости от внешних подрядчиков и сохранение экспертизы внутри предприятия. Повышение квалификации персонала происходит в момент реализации проекта внедрения системы предиктивной аналитики, тем самым оптимизируя общие затраты перспективного проекта.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило, что традиционные стратегии технического обслуживания (реактивная и превентивная) не обеспечивают требуемого уровня надежности промышленных электроприводов в условиях интенсивной эксплуатации. Установлено, что отсутствие непрерывного инструментального контроля деградации силовых полупроводни-

ков (IGBT) и конденсаторов звена постоянного тока является главной причиной внезапных отказов, влекущих значительные экономические потери.

В работе получены следующие основные результаты.

1. Разработана методика гибридной диагностики, основанная на комплексировании физических моделей отказов и алгоритмов машинного обучения. Доказано, что мониторинг дрейфа напряжения насыщения ($V_{CE(ON)}$) и пульсаций напряжения в звене постоянного тока (ΔU_{ac}) позволяет выявлять дефекты на ранней стадии развития (за 160–200 ч до отказа) без использования внешних датчиков.

2. Обоснована двухуровневая архитектура системы, реализующая принцип граничных вычислений (Edge Computing). Это позволяет преодолеть ограничения закрытых промышленных контроллеров ПЧ, передавая телеметрию для глубокого анализа на внешний сервер.

Перспективы дальнейших исследований связаны с апробацией реализованной модели на реальном промышленном объекте, поэтапной адаптацией и доработкой предложенной модели, а также формализацией подходов к техническому обслуживанию и ремонтам для предприятий в виде инструкций/нормативных актов.

Список литературы / References

1. Nagy M, Figura M, Valaskova K, Lăzăroiu G. Predictive maintenance algorithms, artificial intelligence digital twin technologies, and internet of robotic things in big data-driven industry 4.0 manufacturing systems. *Mathematics*. 2025;13(6):981. <https://doi.org/10.3390/math13060981> EDN: NBUSQZ

2. Ramesh K, Raju P, Sasank MVSS. AI-driven predictive maintenance for electric motors: A case study of electric motor scan technology. *Grenze International Journal of Engineering and Technology*. 2025;11(1):1664–1669. Available from: <https://thegrenze.com/index.php?display=page&view=journalabstract&absid=3804&id=8> (accessed: 27.09.2025).

3. Constantino-Robles CD, Castillo Leonardo FA, Galván JH, Alvarez YC, Carrera LAI, Rodríguez-Reséndiz J. Vibration-based predictive maintenance for wind turbines: A Prisma-Guided systematic review on methods, applications, and remaining useful life prediction. *Applied*

Mechanics. 2026;7(1):11. <https://doi.org/10.3390/applmech7010011>

4. Tolbert CL. Leveraging variable frequency drive data for nondestructive testing and predictive maintenance in industrial systems. *NDT*. 2025;3(2):7. <https://doi.org/10.3390/NDT3020007>

5. Ma K, Yang Y, Wang H, Blaabjerg F. Design for reliability of power electronics in renewable energy systems. *Use, Operation and Maintenance of Renewable Energy Systems*. Springer International Publ.; 2014. p. 295–338. ISBN 978-1-4471-6482-1

6. Peyghami S, Wang Z, Blaabjerg F. A guideline for reliability prediction in power electronic converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2020;35(10):10958–10968. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2981933> EDN: DBTDTN

7. Konkimalla S. AI-based predictive maintenance for electric vehicles: Enhancing reliability and performance. *International Journal of Engineering and Computer Science*. 2022;11(12):25647–25661. <http://doi.org/10.18535/ijecs/v11i12.4713> EDN: KRGEVM

8. Jian Y, Chen Z, Peng S, Liu L, Zeng W, Liu J, Liu J, Huang Q. Capacitor aging state evaluation and a remaining-useful-life prediction method based on a CNN-LSTM network considering the impact of parameter dispersion. *Electronics*. 2025;14(22):4452. <https://doi.org/10.3390/electronics14224452> EDN: YZCFEO

9. Zhang Z, Chen X. A knowledge-driven method for IGBT remaining useful life prediction using bidirectional learning and physics-enhanced pathformer networks. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2025;12(1):327–344. <https://doi.org/10.1093/jcd/qwaf082>

10. Taoufyq H, El Guemmat K, Mansouri K, Akef F. Predictive maintenance approaches: a systematic literature review. *Journal of Industrial Engineering and Management*. 2025;18(3):427–458. <https://doi.org/10.3926/jiem.8537> EDN: TJXGUY

11. Muniandi B, Kulkarni SV, Garg S, Howard E. Real-Time Predictive Maintenance of Power Electronics Systems using Machine Learning and IoT Integration. *Naturalista Campano*. 2024;28(1):1876–1887. Available from: <https://museonaturalistico.it/index.php/journal/article/view/353/276> (accessed: 20.01.2026).

12. Fassi Y, Heiries V, Boutet J, Boisseau S. Towards physics-informed machine learning based predictive maintenance for power converters—A review. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2024;39(2):2692–2720. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3328438> EDN: PTWZEZ

13. Ozdagli AI, Koutsoukos X. Model-based damage detection through physics guided learning. *Annual Conference of the PHM Society*. 2021;13(1). <https://doi.org/10.36001/phmconf.2021.v13i1.3012> EDN: YHRKFA

14. Otuyemi F. *Condition monitoring and fault diagnosis of motor-driven systems using electrical signals*. [PhD

Thesis]. [Huddersfield]: University of Huddersfield; 2018. P. 1–285. Available from: https://pure.hud.ac.uk/ws/portalfiles/portal/67175424/Final_Thesis.pdf (accessed: 13.02.2026).

15. Butler R, Cui Y, Liu Z, Jaremko T, Hinds S. The Future for Variable Frequency Drive Predictive Maintenance. *IEEE IAS Pulp and Paper Industry Conference (PPIC)*; 2024 09–13 Jun; Charleston, WV, USA. IEEE; 2024. p. 127–132. <https://doi.org/10.1109/PPIC57149.2024.10902345>

16. Foube F. Power devices health condition monitoring: A review of recent papers. *PHM Society European Conference*. 2021;6(1):136–150. <https://doi.org/10.36001/phme.2021.v6i1.2808> EDN: ZFUMZA

17. Balakrishna P, Akilezkishnamurthy A, Mitalkumar K. *Enhanced electrical signature analysis for fault detection*: Pat.11,639,966 B2 US: G01R 31/34. No. 17/123,456; filed 15.12.2020; publ. 02.05.2023. Available from: <https://patents.google.com/patent/US11639966B2/en> (accessed: 21.08.2025)

18. Vogl GW, Weiss BA, Donmez MA. Standards for prognostics and health management (PHM) techniques within manufacturing operations. *Annual Conference of the*

PHM Society. 2014;6(1). <https://doi.org/10.36001/phmconf.2014.v6i1.2503>

19. Baumann T, Garcia R, Papastergiou K, Pefitsis D. Discharge-based condition monitoring for electrolytic DC-link capacitors. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2024;39(12):16622–16637. <https://doi.org/10.1109/tpel.2024.3442077> EDN: LTWSWV

20. Wang H, Blaabjerg F. Power electronics reliability: State of the art and outlook. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2021;9(6):6476–6493. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2020.3037161> EDN: PMRQXF

21. Habeeb A. Reducing Downtime in Production Lines Through Proactive Maintenance Strategies. *Research Gate*. 2025. Art. 389891476. Available from: https://www.researchgate.net/publication/389891476_Reducing_Downtime_in_Production_Lines_Through_Proactive_Maintenance_Strategies (accessed: 20.12.2025).

22. Smartening up with Artificial Intelligence (AI) : What’s in it for Germany and its Industrial Sector? *McKinsey & Company*. 2017. Available from: <https://www.mckinsey.com/industries/semiconductors/our-insights/smartening-up-with-artificial-intelligence> (accessed: 14.02.2026).

Сведения об авторах

Бунин Никита Вячеславович, аспирант кафедры системного анализа и информатики Института экономики, математики и информационных технологий, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (РАНГХиС), Российская Федерация, 119571, г. Москва, просп. Вернадского, д. 82, стр. 1; eLIBRARI SPIN-код: 7020-2664, ORCID: 0009-0008-5290-2045; e-mail: cool.buninnikita@yandex.ru

Сальников Александр Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и информатики, Институт экономики, математики и информационных технологий, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (РАНГХиС); Российская Федерация, 119571, г. Москва, просп. Вернадского, д. 82, стр. 1; eLIBRARI SPIN-код: 1822-7840, ORCID: 0009-0005-1733-2778; e-mail: salnikov-ay@ranepa.ru

About the authors

Nikita V. Bunin, PhD Student of the Department of Systems Analysis and Informatics, Institute of Economics, Mathematics and Information Technology, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPА), 82, build. 1, ave. Vernadsky, Moscow, 119571, Russian Federation; eLIBRARI SPIN-code: 7020-2664, ORCID: 0009-0008-5290-2045; e-mail: cool.buninnikita@yandex.ru.

Alexander Yu. Salnikov, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Systems Analysis and Informatics, Institute of Economics, Mathematics and Information Technology, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPА), 82, build. 1, ave. Vernadsky, Moscow, 119571, Russian Federation; eLIBRARI SPIN-code: 1822-7840, ORCID: 0009-0005-1733-2778; e-mail: salnikov-ay@ranepa.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-2-215-225


EDN: LACRAB

Научная статья / Research article

Адаптивный алгоритм децентрализованного управления инновационными проектами в условиях ограниченного ресурса внимания руководителя

А.А. Бойков  , М.Н. Ромащенко , Ю.А. Назарова 

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

 1042200032@pfur.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 29 октября 2025 г.

Доработана: 30 января 2026 г.

Принята к публикации: 10 февраля 2026 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта

При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Аннотация. Разработан адаптивный алгоритм децентрализованного управления инновационными проектами, основанный на модели ограниченного внимания руководителя. В условиях роста сложности проектов и высокой неопределенности управленческая нагрузка на центральный контур управления приобретает системный характер, что требует структуризации процедур перераспределения контрольных функций. Предложен алгоритм автоматизированного распределения контроля, учитывающий сложность задач, уровень доверия к исполнителям и значимость результатов для организации. На основе интегрального показателя потребности в контроле реализуется динамический выбор режима управления: централизованное вмешательство, управление по исключениям или децентрализованный контроль. Децентрализация рассматривается не как статическая организационная характеристика, а как адаптивный процесс, активируемый состоянием управленческой нагрузки. Методологическая основа исследования включает элементы теории активных систем, вероятностного анализа и алгоритмического моделирования. Предложенный механизм позволяет снизить риск перегрузки руководителя, повысить устойчивость принятия решений и обеспечить более рациональное использование управленческого ресурса в инновационной деятельности. Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем поддержки управленческих решений и цифровых платформ управления проектами.

Ключевые слова: инновации, ограниченное внимание руководителя, адаптивный механизм, управление по исключениям, распределение контроля, активные системы, алгоритм принятия решений, управленческая нагрузка, организационные системы

Вклад авторов

Бойков А.А. — написание текста, разработка алгоритма, подбор литературы, графическое исполнение; Ромащенко М.Н. — подбор и форматирование списка литературы, перевод на английский язык; Назарова Ю.А. — разработка общей концепции, научное руководство. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования

Бойков А.А., Ромащенко М.Н., Назарова Ю.А. Адаптивный алгоритм децентрализованного управления инновационными проектами в условиях ограниченного ресурса внимания руководителя // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 2. С. 215–225. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-215-225> EDN: LACRAB

© Бойков А.А., Ромащенко М.Н., Назарова Ю.А., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Adaptive Algorithm for Decentralized Management of Innovation Projects Under Conditions of Limited Managerial Attention Resources

Anton A. Boykov[✉], Maksim N. Romashchenko[✉], Yulia A. Nazarova[✉]

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ 1042200032@pfur.ru

Article history

Received: October 29, 2025

Revised: January 30, 2026

Accepted: February 10, 2026

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability

All data obtained during this study are included in the published article.

Abstract. The study proposes an adaptive algorithm for the decentralized management of innovation projects based on a model of limited managerial attention. Under conditions of increasing project complexity and high uncertainty, the managerial workload within the central control loop becomes a systemic constraint, requiring the formalization of procedures for reallocating control functions. An automated algorithm for allocating control functions is proposed, taking into account task complexity, the level of trust in project performers, and the organizational significance of project outcomes. Based on a composite control demand index, the algorithm enables the dynamic selection of a management mode: centralized intervention, management by exception, or decentralized control. Decentralization is interpreted not as a static organizational attribute, but as an adaptive process activated by the state of managerial workload. The methodological framework of the study combines elements of active systems theory, probabilistic analysis, and algorithmic modeling. The proposed algorithm reduces the risk of managerial overload, improves decision-making stability, and supports a more rational use of managerial resources in innovation activities. The results may be applied in the development of managerial decision-support systems and digital project management platforms.

Keywords: innovations, decentralized management, limited managerial attention, adaptive mechanism, management by exception, control allocation, active systems, decision-making algorithm, managerial workload, organizational systems

Authors' contribution

Boikov A.A. — manuscript preparation, algorithm development, selection of relevant literature, and preparation of graphical materials; *Romashchenko M.N.* — selection and formatting of the reference list and translation into English; *Nazarova Yu.A.* — development of the overall research concept and scientific supervision. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Boikov AA, Romashchenko MN, Nazarova YuA. Adaptive algorithm for decentralized management of innovation projects under conditions of limited managerial attention resources. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(2):215–225. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-215-225> EDN: LACRAB

Введение

Развитие инновационных проектов в современных организационных системах сопровождается устойчивым ростом управленческой сложности, обусловленным как технологическими факторами, так и усложнением институциональной и рыночной среды [1; 2]. В условиях высокой неопределенности, характерной для инновационной деятельности, на руководителя проекта или организации возлагается функция интеграции различных потоков инфо-

рмации, координации решений и оперативного реагирования на отклонения от плановых параметров и показателей [3; 4]. При этом в большинстве традиционных моделей управления предполагается неявная возможность неограниченного вовлечения руководителя в управленческий процесс [5], что вступает в противоречие с реальными когнитивными и временными ограничениями. Одним из наименее структурированных, но критически значимых факторов управления является ресурс внимания руководителя [6–8]. В отличие от материальных,

финансовых или трудовых ресурсов, внимание обладает принципиально иной природой — оно ограничено, не накапливается, не поддается прямому масштабированию и характеризуется нелинейным снижением эффективности при перегрузке [9–11]. В условиях инновационных проектов, в которых возрастает интенсивность управленческих событий, данный фактор приобретает системообразующее значение по причине того, что именно перегрузка управленческого центра часто становится причиной запаздывающих решений, роста числа управленческих ошибок и утраты согласованности действий. Исследования в области организационного дизайна и управления инновациями все чаще указывают на необходимость децентрализации управления и перераспределения контрольных функций между элементами организационной системы [12–15]. Вместе с тем децентрализация в большинстве работ рассматривается либо как статическое структурное решение, либо как управленческая рекомендация, которая не сопровождается механизмом адаптации к изменяющейся нагрузке. В результате остается недостаточно проработанным вопрос о том, как и каким образом система управления должна динамически изменять степень централизации в зависимости от состояния управленческого контура и ограничений внимания руководителя. Дополнительную сложность вносит активный характер участников инновационных проектов. С позиций теории активных систем элементы организационной структуры обладают собственными целями, предпочтениями и стратегиями поведения¹ [16; 17], что делает невозможным жестко заданное распределение контроля без учета вероятностной природы управленческих процессов. По этой причине задача разработки адаптивных механизмов и алгоритмов управления, сочетающих принципы децентрализации, управления по исключениям и автоматизированного перераспределения контрольных функций на основе структурированных критериев, является

актуальной. Несмотря на наличие исследований, посвященных отдельным аспектам ограниченного внимания [18; 19], управлению по исключениям [20–22] и стохастическому моделированию организационных процессов [23–25], полноценные методологические модели, объединяющие данные подходы в рамках единого механизма управления инновационными проектами, отсутствуют. Недостаточно исследован потенциал применения элементов теории вероятностей, марковских процессов, энтропийного подхода и теории очередей для структуризации динамики управленческой нагрузки и обоснования переходов между различными режимами управления.

Цель исследования — разработка адаптивного алгоритма децентрализованного управления инновационными проектами, основанного на модели ограниченного внимания руководителя и учитывающего активный характер элементов организационной системы. Предлагаемый подход ориентирован не на описание организационной структуры как таковой, а на структуризацию алгоритма перераспределения контроля, позволяющего снизить управленческую перегрузку, повысить устойчивость принятия решений и обеспечить приемлемые показатели эффективности в условиях высокой неопределенности.

1. Материалы и методы

Методологической основой исследования является представление инновационного проекта как активной организационной системы, функционирующей в условиях ограниченного управленческого ресурса внимания руководителя. В рамках данной логики управление рассматривается не как совокупность регламентированных процедур, а как процесс динамического распределения контрольных воздействий между элементами системы при наличии неопределенности и стохастического характера управленческих событий. Исследование носит методологический характер и опирается на

¹ Новиков Д.А., Петраков С.Н. Курс теории активных систем : учебное пособие. Москва, 1999. 105 с. EDN: PFGVQV

сочетание аналитических, вероятностных и имитационных методов. Центральным элементом является модель ограниченного внимания руководителя, интегрированная с механизмами децентрализации управления, управления по исключениям и автоматизированного перераспределения контрольных функций. Для актуализации динамики управленческой нагрузки используются элементы теории вероятностей, марковских процессов и теории очередей, а для учета качественной неопределенности — методы нечетко-множественного анализа и метода анализа иерархий.

Внимание руководителя рассматривается как ограниченный управленческий ресурс, определяющий пропускную способность центрального контура управления. Под вниманием понимается совокупность когнитивных и временных возможностей руководителя по восприятию, интерпретации и принятию управленческих решений в единицу времени. Пусть A — максимальный объем внимания руководителя за интервал времени T , выраженный в условных единицах управленческих действий. Тогда фактическая нагрузка $L(t)$ формируется потоком управленческих событий, требующих реакции. При $L(t) \leq A$ управление осуществляется в централизованном режиме, при превышении порогового значения возникает эффект перегрузки, приводящий к росту вероятности ошибок и задержек принятия решений. В отличие от классических моделей, предполагающих линейную зависимость между нагрузкой и эффективностью [26; 27], в работе принимается гипотеза о нелинейном характере деградации эффективности управления при приближении к пределу внимания. Это позволяет интерпретировать перегрузку не как количественное, а как качественное изменение режима функционирования управленческой системы.

Дефицит времени руководителя проекта можно представить как ограничение пропускной способности канала управления:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \tau_i \leq T_{\text{общее}},$$

где λ_i — интенсивность потока задач от i -го сотрудника, τ_i — время, потраченное на контроль одной задачи. Если $\Lambda > T_{\text{общее}}$, то система теряет устойчивость и, соответственно, необходимо делегировать функции контроля алгоритмизированной системе. Рассмотрим теоретические и аналитические подходы, представленные в виде различных методологических инструментов.

Для снижения нагрузки на управленческий центр используется принцип управления по исключениям, в рамках которого в зону прямого внимания руководителя попадают только те события, которые выходят за пределы допустимых параметров функционирования проекта. Каждое управленческое событие e_i характеризуется вектором параметров x_i , сопоставляемым с допустимыми интервалами норм X . В случае выполнения условий нормальности событие обрабатывается на децентрализованном уровне, в противном случае формируется исключение, которое требует участия руководителя. Таким образом, управление по исключениям выступает не как организационный прием, а как фильтр входного потока управленческих воздействий для регулировки загрузки управленческого центра.

Элементы инновационного проекта рассматриваются как активные подсистемы, обладающие собственными целями и предпочтениями. Это исключает возможность жесткого алгоритмического управления без учета вероятностного поведения исполнителей. В рамках теории активных систем перераспределение контрольных функций трактуется как задача выбора такого распределения полномочий, при котором достигается компромисс между снижением нагрузки на руководителя и сохранением управляемости проекта. Контрольные функции могут передаваться на нижестоящие уровни при условии достижения заданного уровня доверия и приемлемого риска отклонений. Данный подход позволяет интерпретировать децентрализацию не как структурное решение, а как динамический процесс, управля-

емый состоянием системы и характеристиками ее элементов.

Для структуризации динамики поступления управленческих событий используется аппарат теории вероятностей и марковских процессов². Поток событий моделируется как случайный процесс, интенсивность которого зависит от стадии инновационного проекта и внешних условий. Состояние управленческой системы в момент времени описывается дискретным набором состояний: S_0 — нормальный режим, S_1 — режим повышенной нагрузки, S_2 — режим перегрузки. Переходы между состояниями моделируются как марковский процесс с заданной матрицей переходных вероятностей. Это позволяет анализировать вероятность попадания системы в режим перегрузки и оценивать эффективность механизмов децентрализации как инструментов управления переходами между состояниями.

Для количественной оценки уровня неопределенности в системе управления используется энтропийный подход [28; 29]. Энтропия интерпретируется как мера распределенности управленческих решений и неопределенности состояния проекта. Рост энтропии соответствует увеличению неопределенности и снижению предсказуемости управляемых процессов. Введение адаптивного алгоритма децентрализации рассматривается как способ ограничения роста энтропии за счет перераспределения контрольных функций и сокращения числа критических состояний. Энтропийные показатели используются не как абсолютные критерии, а как индикаторы необходимости перехода между режимами управления. Для определения приоритетов перераспределения контрольных функций применяется метод анализа иерархий, позволяющий учитывать как количественные, так и качественные критерии [30–32]. В качестве критериев обычно рассматриваются критичность функции, риск ошибок, уровень автономности исполнителя, влияние на ключевые пока-

затели проекта. Нечетко-множественный анализ используется для оценок в условиях неопределенности, характерной для инновационных проектов [33; 34]. Это позволяет избежать искусственной точности и повысить устойчивость принимаемых решений.

Для оценки пропускной способности управленческого центра и эффектов перегрузки применяется теория очередей [35; 36]. Управленческий центр моделируется как система массового обслуживания с ограниченной производительностью, где заявками являются управленческие события. Имитационное моделирование используется для проверки работоспособности предложенного алгоритма в различных сценариях интенсивности нагрузки. Это позволяет выявить критические значения параметров, при которых целесообразен переход от централизованного к децентрализованному управлению. Имитационное моделирование возможно провести в специализированном программном обеспечении, например AnyLogic, GPSS World, Arena, anyLogistix, Business Studio и SILA Union и др. В рамках научного исследования имитационное моделирование не проводилось по причине отсутствия доступа к специализированному программному обеспечению и рассмотрению предложенного адаптивного алгоритма только в теоретической плоскости.

Таким образом, авторами статьи на основании рассмотренных методологических инструментов предлагается адаптивный алгоритм автоматизированного распределения контроля:

$$F = \frac{kS}{C},$$

где F — относительный индекс потребности в управленческом контроле; S — индекс сложности; C — индекс доверия к исполнителю; k — коэффициент важности инновационного проекта. Все показатели, используемые в алгоритме, имеют безразмерный характер и интерпретируются как нормированные управленче-

² Смирнов В.Н. Теория и методы принятия управленческих решений : учеб. пособие. Владимир : ВлГУ, 2025. 163 с. ISBN 9785-9984-2097-9

ские индексы. Относительный индекс потребности в управленческом контроле не является физической величиной и не измеряется во временных единицах, а отражает относительную потребность задачи в управленческом внимании. Пороговые значения задаются на уровне организационной политики и определяют границы перехода между режимами децентрализованного управления, управления по исключе-

ниям и централизованного вмешательства. Необходимо выделить несколько порогов:

$F \leq F_1$ — децентрализованный порог;

$F_1 < F \leq F_2$ — управление по исключениям;

$F > F_2$ — вмешательство руководителя.

Получившийся адаптивный алгоритм автоматизированного распределения контрольных функций в инновационном проекте представлен на рисунке.

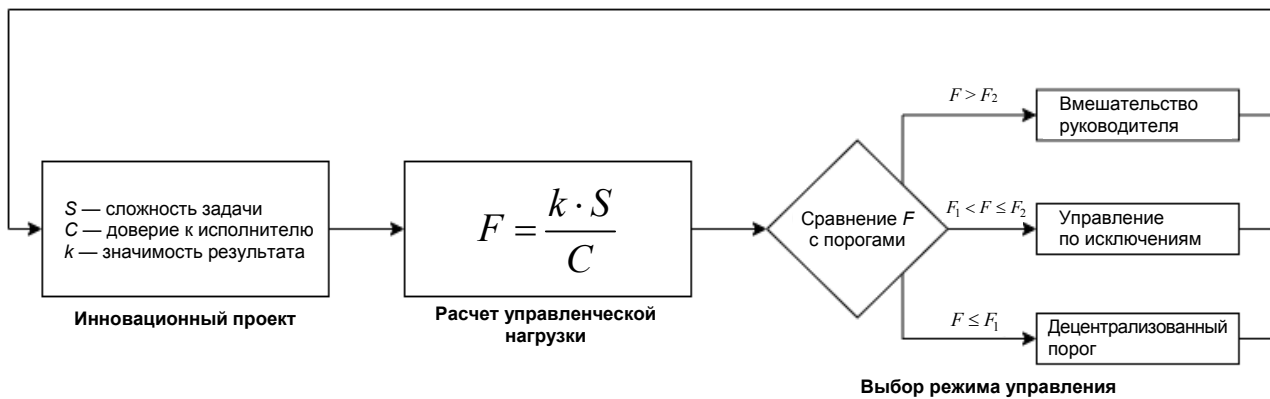
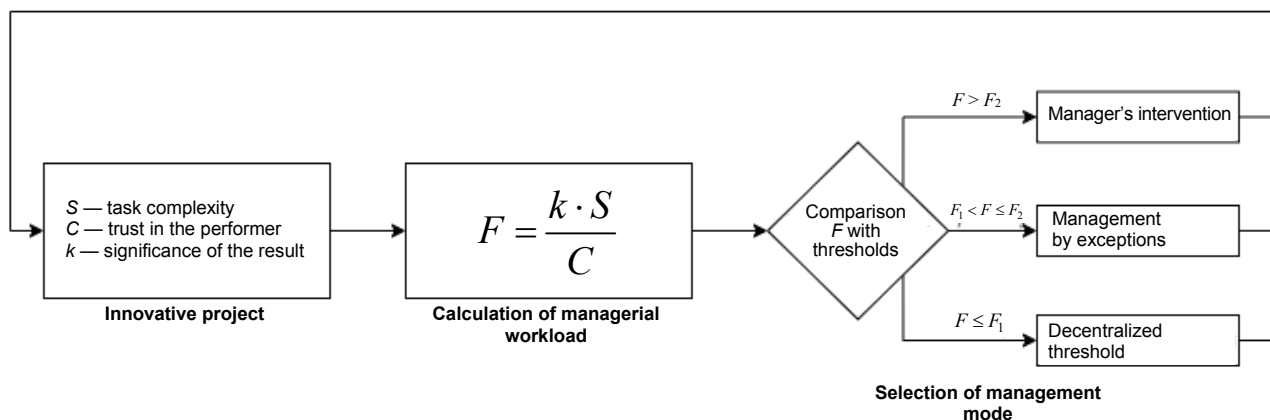


Схема адаптивного алгоритма автоматизированного распределения контрольных функций в инновационном проекте
Источники: выполнено А.А. Бойковым.



Flowchart of the adaptive algorithm for automated allocation of control functions in an innovation project
Source: by A.A. Boykov.

2. Результаты и обсуждение

В результате проведенного исследования разработан адаптивный механизм автоматизированного распределения контрольных функций в инновационном проекте, основанный на

модели ограниченного внимания руководителя. Механизм реализован в виде алгоритма принятия управленческих решений, позволяющего динамически выбирать режим управления в зависимости от характеристик управляемых задач и текущей управленческой нагрузки. Ключевыми

чевым результатом является структуризация процедуры расчета частоты контроля на основе индекса сложности задачи, уровня доверия к исполнителю и значимости результата для структуры в целом. Использование данного показателя позволяет разграничить зоны централизованного управления, управления по исключениям и децентрализованного контроля, обеспечивая адаптацию управленческой структуры к изменяющимся условиям реализации инновационного проекта. Предложенный механизм обеспечивает перераспределение контрольных функций без постоянного участия руководителя в операционных решениях, при этом вмешательство руководителя сохраняется для задач, характеризующихся высокой сложностью и критической значимостью. Такой подход позволяет ограничить рост управленческой нагрузки и снизить вероятность перегрузки центрального управленческого контура. Полученный алгоритм может быть интерпретирован как механизм перехода между различными режимами управления в зависимости от состояния системы и параметров управляемых задач. Алгоритм представлен в виде концептуально-алгоритмической схемы, разработанной в программном обеспечении draw.io.

Полученные результаты подтверждают целесообразность рассмотрения внимания руководителя как самостоятельного управленческого ресурса, ограниченность которого оказывает прямое влияние на устойчивость управления инновационными проектами. В отличие от традиционных моделей, предполагающих фиксированную степень централизации, предложенный алгоритм позволяет учитывать динамический характер управленческой нагрузки и неопределенности. Существенным преимуществом предложенного подхода является его алгоритмическая реализуемость. Адаптивный механизм не требует жесткой регламентации организационной структуры и может быть встроен в существующие системы управления проектами в виде модуля поддержки принятия решений. Это расширяет возможности практического применения результатов исследования

без радикального изменения управленческих процессов. В то же время эффективность механизма зависит от корректности оценки индексов сложности и доверия. В условиях инновационных проектов данные параметры могут изменяться во времени и могут быть субъективными. Использование механизмов обратной связи и нечетко-множественных представлений позволяет снизить влияние данных ограничений и обеспечить адаптацию алгоритма по мере накопления управленческого опыта. Также следует отметить, что предложенный механизм ориентирован, прежде всего, на проекты с высокой степенью неопределенности и интенсивным потоком управленческих событий. В более стабильных организационных системах его применение требует дополнительной настройки параметров и пороговых значений.

Заключение

В рамках исследования разработан адаптивный механизм децентрализованного управления инновационными проектами, основанный на модели ограниченного внимания руководителя и принципах автоматизированного распределения контроля. Предложен алгоритм, позволяющий структурировать выбор режима управления в зависимости от сложности задач, уровня доверия к исполнителям и значимости результатов для организации. Научная новизна работы заключается в представлении децентрализации управления как динамического процесса адаптации, а не статической характеристики организационной структуры. Интеграция управления по исключениям и модели ограниченного внимания в единую алгоритмическую схему позволяет повысить устойчивость управленческих решений и снизить риск перегрузки руководителя. Практическая значимость результатов состоит в возможности использования предложенного механизма в системах управления инновационными проектами и цифровых платформах поддержки управленческих решений. Дальнейшие исследования могут быть направлены на имитационное моделирование работы алгоритма в специализированном про-

граммном обеспечении, а также на уточнение параметров механизма и расширение модели на несколько управленческих центров.

Список литературы

1. *Стрижакова Е.Н., Стрижаков Д.В.* Развитие инновационной деятельности в Российской Федерации: проблемы и перспективы // *Экономика науки*. 2023. Т. 9. № 2. С. 31–46. <https://doi.org/10.22394/2410-132X-2023-9-2-31-46> EDN: CNWQUG
2. *Васяйчева В.А.* Развитие подходов к управлению инновационной деятельностью промышленных предприятий. Самара : САМАРАМА, 2022. 188 с. ISBN 978-5-6048162-7-1 EDN: WVMOWO
3. *Kerzner H.* Project management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling. John Wiley & Sons Publ., 2025. 720 p. ISBN 978-1-394-29003-1
4. *Целуйкина Т.Г., Федорова А.В.* Управление в условиях неопределенности // *Вестник Поволжского института управления*. 2023. Т. 23. № 3. С. 68–79. <https://doi.org/10.22394/1682-2358-2023-3-68-79> EDN: XPVOPG
5. *Коркин С.А.* Процессы, методы, модели и инструменты управления проектами // *Региональная и отраслевая экономика*. 2024. № S1. С. 32–39. <https://doi.org/10.47576/2949-1916.2024.88.84.004> EDN: AEGCWN
6. *Хайруллин М.Ф.* Роль руководителя в системе проектного менеджмента // *Экономика и бизнес: теория и практика*. 2024. № 12-3. С. 151–153. <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2024-12-3-151-153> EDN: QGOZER
7. *Тумов С.А., Тумова Н.В.* Личность руководителя проекта: характеристики и компетенции // *Вестник университета*. 2024. № 4. С. 33–41. <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2024-4-33-41> EDN: XJRMCSJ
8. *Капустина Н.В.* Финансовое обоснование инвестиционного проекта: основные методы оценки эффективности // *Вестник евразийской науки*. 2023. Т. 15. № S6. EDN: ATFZCL
9. *Бобровская С.М., Бухарова В.П., Каримова С.* Внимание, как особый психический процесс // *Труды XIV Евразийского научного форума*. Санкт-Петербург, 15–16 декабря 2022 г. Санкт-Петербург, 2023. С. 23–31. EDN: KWQZIK.
10. *Кунцова О.В.* Внимание как особый психический процесс // *Проблемы современной науки и образования*. 2017. № 20 (102). С. 83–85. EDN: YPASCZ
11. *Cowan N., Bao C., Bishop-Chrzanowski B.M., Costa A.N., Greene N.R., Guitard D., Li C., Musich M.L., Ūnal Z.E.* The Relation Between Attention and Memory // *Annual Review Psychology*. 2024. Vol. 75. P. 183–214. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-040723-012736> EDN: GSNOGK
12. *Hnatiienko O., Kuchanskyi O.* The concept of analysis the functional sustainability of the organizational system // *Управление развитием сложных систем*. 2023. No. 55. P. 98–103. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.55.98-103> EDN: HHUDHN
13. *Аксенов С.Г., Егорова О.В.* Теоретические основы управления организационными системами // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики*. Серия: Естественные и технические науки. 2024. № 8. С. 50–55. EDN: IDDDWOI
14. *Кохова И.В., Пряжникова Е.Ю.* Управление человеческими ресурсами как катализатор инновационной активности // *Вестник евразийской науки*. 2024. Т. 16. № S5. EDN: XCKHPG
15. *Наугольнова И.А.* Менеджмент 4.0: эволюция и инновации в управлении организацией в цифровую эпоху // *Теория и практика общественного развития*. 2023. № 6 (182). С. 220–226. <https://doi.org/10.24158/tipor.2023.6.28> EDN: KESNPND
16. *Русяева Е.Ю., Салтыков С.А.* Концептуальные основы теории активных систем, их развитие в теории управления организационными системами: тенденции и перспективы // *Проблемы управления*. 2017. № 4. С. 74–83. EDN: ZCMMIF
17. *Новиков Д.А.* Состояние и перспективы теории активных систем // *Управление большими системами: сборник трудов*. 2004. № 9. С. 7–26. EDN: HTMUXN
18. *Gifford Sh.* Allocation of entrepreneurial attention // *Journal of Economic Behavior & Organization*. 1992. Vol. 19. Iss. 3. P. 265–284. [https://doi.org/10.1016/0167-2681\(92\)90038-D](https://doi.org/10.1016/0167-2681(92)90038-D)
19. *Hilary G., McLean D.* Handbook of financial decision making. Edward Elgar Publ.; 2013. ISBN 1802204164
20. *Мокроносов А.Г., Балашов А.А.* Применение технологии управления по исключениям для выявления проблемных зон на предприятии // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. *Экономические науки*. 2011. № 6 (137). С. 102–106. EDN: OYPWXL
21. *Feng K., Wang S., He L., Li Y.* Leader-member exchange and emotional exhaustion in registered construction engineers: mediating role of active management by exception and moderating role of self-esteem // *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2025. Vol. 32. No. 13. P. 49–67. <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2024-1122>
22. *Kai J., Youngho H.* The Impact of Active Management by Exception on Employee Innovative Behavior: The Mediating Role of Instrumental Organizational Support // *Journal of Sociology and Education*. 2025. Vol. 1. No. 5. <https://doi.org/10.63887/jse.2025.1.5.1> EDN: FRBRLT
23. *Шмеленко А.А.* Управление процессами принятия решений в организационных системах автотранспортных предприятий на основе аппарата стохастического моделирования : дис. ... канд. техн. наук. 2024. 149 с. EDN: KYZQSC

24. Prech K., Landi G.T., Meier F., Nurgalieva N., Potts P.P., Silva R., Mitchison M.T. Optimal time estimation and the clock uncertainty relation for stochastic processes // *Physical Review X*. 2025. Vol. 15. Article no. 031068. <https://doi.org/https://doi.org/10.1103/rpls-mp8z>

25. Агаджанян Р.Б., Байжанова Д.О., Маркосян М.В. Исследование и автоматизация контроля стохастических отклонений в системах организационного управления производственным процессом // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2018. Т. 45. № 1. С. 88–97. EDN: XPTYLB

26. Parasuraman R., Rovira E. Workload modeling and workload management: Recent theoretical developments // *Army Research Lab ARL-CR*. 2005. 562 p.

27. Kuntz L., Mennicken R., Scholtes S. Stress on the ward — an empirical study of the nonlinear relationship between organizational workload and service quality // *Ruhr Economic Papers*, 2011. No. 277. ISBN 978-3-86788-322-1

28. Погорелова Л.А. Энтропийный подход к управлению объемами незавершенного производства на предприятии // *Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий*. 2025. Т. 14. № 4. С. 119–125. <https://doi.org/10.24412/2225-8264-2025-4-1013> EDN KNJKIM

29. Бурик Н.А. Методы оценки энтропии и анализа отраслевого развития экономики // *Экономика и управление*. 2024. Т. 30. № 4. С. 418–424. <https://doi.org/10.35854/1998-1627-2024-4-418-424> EDN GRBVRS

30. Семенихина Н.Б. Метод анализа иерархий как системный подход к проблеме принятия решений // *Дискуссия*. 2023. № 2 (117). С. 38–48. <https://doi.org/10.46320/2077-7639-2023-2-117-38-48> EDN VZFMHF

31. Гладков А.Н., Магомедов У.А. Исследование проблем принятия решений методом анализа иерархий // *Применение современных информационных технологий в образовательном процессе : сб. статей Межвузовской научно-практической конференции*. Пермь, 23 марта 2017 г. Пермь : ПВИ войск национальной гвардии, 2017. С. 252–257. EDN: ZGOPXV

32. Федосеев В.Н., Зайцева И.А. Информационно-аналитический подход к решению сложных слабоструктурированных задач методом анализа иерархий (МАИ) // *Теория и практика технических, организационно-технологических и экономических решений : сб. научных трудов*. Иваново, 2019. Т. 8. С. 72–82. EDN: KWLNVF

33. Целых А.Н., Котов Э.М. Методы нечетко-множественного анализа и моделирования социальных графов // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 6. С. 98. EDN: RVCPEP

34. Баженов А.В. Нечетко-множественное моделирование в анализе и прогнозировании экономических явлений и процессов // *Учетно-финансовая наука — реальному сектору экономики Ставропольского края : материалы и доклады научно-практической конферен-*

ции. Ставрополь, 16 декабря 2014 года. Ставрополь : Секвойя, 2014. С. 9–13. EDN: TLRKCZ

35. Рыжиков Ю.И. Теория очередей и распределение Парето // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. 2015. № 648. С. 28–43. EDN: UZMKMF

36. Рыжиков Ю.И. Современные методы теории очередей // *Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты)*. 2013. № 2 (6). С. 5–15. EDN: LAZBSM

References

1. Trizhakova EN, Strizhakov DV. Development of innovation activity in the Russian Federation: Problems and prospects. *Economics of Science*. 2023;9(2):31–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.22394/2410-132X-2023-9-2-31-46> EDN: CNWQUG

2. Vasyaycheva VA. *Development of approaches to managing innovation activities of industrial enterprises*. Samara: Samarama LLC; 2022. (In Russ.) ISBN 978-5-6048162-7-1 EDN: WVMOWO

3. Kerzner H. *Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling*. John Wiley & Sons Publ.; 2025. ISBN 978-1-394-29003-1

4. Tseluykina TG, Fedorova AV. Management under conditions of uncertainty. *The Bulletin of The Volga Region Institute of Administration*. 2023;23(3):68–79. (In Russ.) <https://doi.org/10.22394/1682-2358-2023-3-68-79> EDN: XPVOPG

5. Korkin SA. Project management processes, methods, models and tools. *Regional and Branch Economy*. 2024;S1:32–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.47576/2949-1916.2024.88.84.004> EDN: AEGCWN

6. Khairullin MF. The role of the manager in the project management system. *Economics and Business: Theory and Practice*. 2024;(12-3):151–153. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2024-12-3-151-153> EDN: QGOZER

7. Titov SA, Titova NV. Project manager's personality: Traits and competencies. *University Bulletin*. 2024;(4): 33–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2024-4-33-41> EDN: XJRM CJ

8. Kapustina NV. Financial justification for an investment project: Basic methods for assessing effectiveness. *Eurasian Scientific Journal*. 2023;15(S6):51. (In Russ.) EDN: ATFZCL

9. Bobrovskaya SM, Bukharova VP, Karimova S. Attention as a specific mental process. In *Proceedings of the XIV Eurasian Scientific Forum*. 2022 15–16 Dec; St. Petersburg. St. Petersburg: Autonomous Non-Profit Organization of Higher Education “University under the Interparliamentary Assembly of EurAsEC”; 2023. p. 23–31. (In Russ.) EDN: KWQZIK

10. Kuptsova OV. Attention as a specific mental process. *Problems of Modern Science and Education*. 2017; 20(102):83–85. (In Russ.) EDN: YPASCZ

11. Cowan N, Bao C, Bishop-Chrzanowski BM, Costa AN, Greene NR, Guitard D, Li C, Musich ML, Únal ZE. The relation between attention and memory. *Annual Review of Psychology*. 2024;75:183–214. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-040723-012736>
12. Hnatiienko O, Kuchanskyi O. The concept of analysis of the functional sustainability of the organizational system. *Management of Development of Complex Systems*. 2023;55:98–103. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.55.98-103> EDN: HHUDHN
13. Aksenov SG, Egorova OV. Theoretical foundations of organizational systems management. *Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2024;(8):50–55. (In Russ.) EDN: IDDDWOI
14. Kokhova IV, Pryazhnikova EYu. Human resource management as a catalyst for innovative activity. *Bulletin of Eurasian Science*. 2024;16(S5). (In Russ.) EDN: XCKHPG
15. Naugolnova IA. Management 4.0: Evolution and innovations in managing organization in the digital era. *Theory and Practice of Social Development*. 2023;6(182): 220–226. (In Russ.) <https://doi.org/10.24158/tipor.2023.6.28> EDN: KESNPN
16. Rusaeva EYu, Saltykov SA. Conceptual foundations of active systems theory and their evolution in organizational systems management theory: Trends and prospects. *Problems of Management*. 2017;4:74–83. (In Russ.) EDN: ZCMMIF
17. Novikov DA. State and prospects of active systems theory. *Management of Large-Scale Systems: Proceedings*. 2004;9:7–26. (In Russ.) EDN: HTMUXN
18. Gifford S. Allocation of entrepreneurial attention. *Journal of Economic Behavior & Organization*. 1992;19(3): 265–284. [https://doi.org/10.1016/0167-2681\(92\)90038-D](https://doi.org/10.1016/0167-2681(92)90038-D)
19. Hilary G, McLean D. *Handbook of Financial Decision Making*. Edward Elgar Publ.; 2013. ISBN 1802204164
20. Mokronosov AG, Balashov AA. Application of management by exception technology to identify problem areas in an enterprise. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*. 2011;6(137):102–106. (In Russ.) EDN: OYPWXL
21. Feng K, Wang S, He L, Li Y. Leader–member exchange and emotional exhaustion in registered construction engineers: Mediating role of active management by exception and moderating role of self-esteem. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2025;32(13): 49–67. <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2024-1122> EDN: LVUAMJ
22. Kai J, Youngho H. The impact of active management by exception on employee innovative behavior: The mediating role of instrumental organizational support. *Journal of Sociology and Education*. 2025;1(5). <https://doi.org/10.63887/jse.2025.1.5.1> EDN: FRBRLT
23. Shtepa AA. *Management of decision-making processes in organizational systems of motor transport enterprises based on stochastic modeling*. [PhD dissertation]. [Voronezh]: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Technical University”; 2024. EDN: KYZQSC
24. Prech K, Landi GT, Meier F, Nurgalieva N, Potts PP, Silva R, Mitchison MT. Optimal time estimation and the clock uncertainty relation for stochastic processes. *Physical Review X*. 2025;15:031068. <https://doi.org/10.1103/rpls-mp8z>
25. Agadzhanian RB, Baizhanova DO, Markosyan MV. Technical science computer science, computer engineering and management control research and automation of stochastic deviations in organisational management production process systems. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2018;45(1): 88–97. (In Russ.) EDN: XPTYLB
26. Parasuraman R, Rovira E. *Workload modeling and workload management: Recent theoretical developments*. Army Research Laboratory Report; 2005.
27. Kuntz L, Mennicken R, Scholtes S. Stress on the ward: An empirical study of the nonlinear relationship between organizational workload and service quality. *Ruhr Economic Papers*; 2011;(277). ISBN 978-3-86788-322-1
28. Pogorelova LA. Entropy approach to managing work-in-progress volumes at an enterprise. *Bulletin of the Siberian Institute of Business and Information Technologies*. 2025;14(4):119–125. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2225-8264-2025-4-1013> EDN: KNJKIM
29. Burik NA. Methods for estimating entropy evaluation and analysis of sectoral development of the economy. *Economics and Management*. 2024;30(4):418–424. (In Russ.) <https://doi.org/10.35854/1998-1627-2024-4-418-424> EDN: GRBVRS
30. Semenikhina NB. The study of problems of decision making by the method of analyzing hierarchies. *Discussion*. 2023;2(117):38–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.46320/2077-7639-2023-2-117-38-48> EDN: VZFMHF
31. Gladkov AN, Magomedov UA. Study of decision-making problems using the analytic hierarchy process. *Application of Modern Information Technologies in the Educational Process: Proceedings of the Interuniversity Scientific and Practical Conference*. Perm, March 23, 2017. Perm: Perm military Institute of National Guard Troops, 2017. p. 252–257. (In Russ.) EDN: ZGOPXV
32. Fedoseev VN, Zaitseva IA. Examination of object-spatial modeling of air heat pump method of analysis of hierarchies. *Theory and Practice of Technical, Organizational-Technological and Economic Solutions: Collection of Scientific Papers*. 2019;8:72–82. (In Russ.) EDN: KWLNVF
33. Tselykh AN, Kotov EM. Methods of fuzzy set analysis and modeling of social graphs. *Modern Problems of Science and Education*. 2013;6:98. (In Russ.) EDN: RVCPEP

34. Bazhenov AV. Fuzzy set modeling in the analysis and forecasting of economic phenomena and processes. In *Accounting and Financial Science for the Real Sector of the Stavropol Territory Economy: Materials and Reports of the Scientific and Practical Conference*. Stavropol, December 16, 2014. Stavropol : Sequoia Publ.; 2014. p. 9–13. (In Russ.) EDN: TLRK CZ

35. Ryzhikov YuI. Queueing theory and Pareto distribution. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2015;648:28–43. (In Russ.) EDN: UZMKMF

36. Ryzhikov YI. Modern methods in theory of queues. *Natural and Technogenic Risks (Physical-Mathematical and Applied Aspects)*. 2013;2(6):5–15. (In Russ.) EDN: LAZBSM

Сведения об авторах

Бойков Антон Алексеевич, аспирант кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 7501-3304, ORCID: 0000-0002-7991-5283; e-mail: 1042200032@pfur.ru

Ромащенко Максим Николаевич, аспирант кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0003-5277-2571; e-mail: 1142220732@pfur.ru

Назарова Юлия Александровна, кандидат экономических наук, доцент кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 8702-4283, ORCID: 0000-0002-5017-0281; e-mail: j.a.nazarova@mail.ru

About the authors

Anton A. Boykov, PhD student of the of Innovation Management in Industrial Sectors, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 7501-3304, ORCID: 0000-0002-7991-5283; e-mail: 1042200032@pfur.ru

Maksim N. Romashchenko, PhD student of the Department Innovation Management in Industrial Sectors, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0003-5277-2571; e-mail: 1142220732@pfur.ru

Yulia A. Nazarova, PhD in Economics, Associate Professor of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8702-4283, ORCID: 0000-0002-5017-0281; e-mail: j.a.nazarova@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-2-226-236

EDN: LAGIXN

Research article / Научная статья

Comparison of the Model and the Experiment of Synchronizing Two Shafts with a PID Controller Using Incremental Encoders and Frequency Converters

Mikhail I. Kukharskii^a✉, Anton O. Zhuravlev^a✉, Denis A. Andrikov^{a,b}✉

^aRUDN University, Moscow, Russian Federation

^bBauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

✉ mkukharskii@mail.ru

Article history

Received: December 14, 2025

Revised: February 20, 2026

Accepted: February 25, 2026

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability

All data obtained during this study are included in the published article.

Abstract. The precise synchronization of the main drive shaft and the driven shaft of a screw conveyor is a critical industrial task, upon which the overall operability of the screw conveyor depends, as well as the maintenance of the drive shafts, sprockets, and belt in a functional state. This study presents a comparative analysis of the experimental application and simulation results of a PID controller for synchronizing the rotation of two shafts using incremental encoders and frequency converters. Modern methods of automated control systems are adopted as the methodological basis of the research, including the adjustment of parameters for frequency converters and PID controllers, and the digital processing of encoder signals. The objective of the study is to compare the accuracy and dynamic characteristics obtained during the simulation phase with the results obtained from the real system. The research task is to develop a mathematical model of the system, tune optimal PID controller parameters for both the mathematical model and the real system, and analyze the resulting discrepancies between the data, identifying their causes. As a result of the study, a mathematical model of the synchronization system was developed, optimal PID controller parameters were determined, the main factors causing discrepancies between simulation and the real system operation were analyzed, and recommendations were formulated to improve its accuracy.

Keywords: position feedback, variable-frequency drive, simulation modeling, transient process, automated control systems

Authors' contribution

Kukharskii M.I. — writing the source text, developing a mathematical model, and commissioning; *Zhuravlev A.O.* — analysis of scientific literature, recommendations; *Andrikov D.A.* — scientific management, research concept. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Kukharskii MI, Zhuravlev AO, Andrikov DA. Comparison of the model and the experiment of synchronizing two shafts with a PID controller using incremental encoders and frequency converters. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026; 27(2):226–236. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-226-236> EDN: LAGIXN

© Kukharskii M.I., Zhuravlev A.O., Andrikov D.A., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Сравнение модели и эксперимента синхронизации двух валов ПИД-регулятором с инкрементальными энкодерами и преобразователями частоты

М.И. Кухарский^a, А.О. Журавлёв^a, Д.А. Андриков^{a,b}

^a Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^b Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

✉ mkukharskii@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 14 декабря 2025 г.

Доработана: 20 февраля 2026 г.

Принята к публикации: 25 февраля 2026 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта

При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Аннотация. Точная синхронизация вала основного двигателя и вала приводного языка спирального транспортера является важной задачей в промышленности, где от нее зависит работоспособность спирального транспортера в целом, а также сохранение приводных валов, звезд и ленты в работоспособном состоянии. Представлен сравнительный анализ экспериментального применения и результатов моделирования ПИД-регулятора для синхронизации вращения двух валов с использованием инкрементальных энкодеров и управляемых преобразователями частоты. В качестве методологической базы исследования использованы современные методы управления автоматизированных систем управления, включая настройку параметров преобразователей частоты и ПИД-регулятора и цифровую обработку сигналов энкодеров. Цель исследования — провести сопоставление точности и динамических характеристик, полученных на этапе моделирования, с результатами, полученными на реальной системе. Задача исследования — разработать математическую модель системы, настроить оптимальные параметры ПИД-регулятора как для математической модели, так и для реальной системы и изучить полученные расхождения между данными, выявив их причины. По итогам исследования разработана математическая модель системы синхронизации, определены оптимальные параметры ПИД-регулятора, проанализированы основные факторы, вызывающие расхождения между симуляцией и реальной работой системы, и сформулированы рекомендации для повышения ее точности.

Ключевые слова: обратная связь по положению, частотно-регулируемый привод, имитационное моделирование, переходный процесс, автоматизированные системы управления

Вклад авторов

Кухарский М.И. — написание исходного текста, разработка математической модели, пуско-наладочные работы; Журавлёв А.О. — анализ научной литературы, рекомендации; Андриков Д.А. — научное руководство, концепция исследования. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования

Кухарский М.И., Журавлёв А.О., Андриков Д.А. Сравнение модели и эксперимента синхронизации двух валов ПИД-регулятором с инкрементальными энкодерами и преобразователями частоты // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 2. С. 226–236. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-226-236> EDN: LAGIXN

Introduction

Modern advances in automatic control theory, modern control systems, and digital technologies are actively promoting the automation of industrial processes. One of the key challenges in this area is

ensuring precise synchronization of moving parts in complex process equipment. This includes some spiral conveyors, complexity of which stems from design features and dimensional requirements, necessitating a second gear motor. Experience with such systems shows that even minor errors can

lead to serious consequences for both the equipment manufacturer and the customer.

The relevance of this topic and the demand for technological solutions stem from the challenges inherent in the design and operation of such systems. Engineering errors associated with incorrect assessment of nonlinearities, disturbances, or dynamic characteristics lead to reduced equipment efficiency and shorten its service life. To avoid significant time and material costs, it is necessary to develop a formalized mathematical model for determining the parameters and configuration of the shaft synchronization system. This model will serve as the basis for subsequent implementation and testing on real equipment. PID controllers, whose methods have proven their effectiveness, are widely used in automation. To solve the given synchronization problem, careful tuning of the PID controller parameters is necessary [1; 2]. Modern digital technologies, such as programmable logic controllers (PLCs), allow for the tuning of data on physical processes and controllers virtually and with minimal latency, minimizing the time spent on experiments on real equipment [3].

In modern industry, approximately 95% of control loops use PID control technology [4]. In Japan, the use of PID control has reached 85.4% [5], and this figure continues to grow every year. In 2002, Desborough and Miller conducted a study that showed that in the United States there are more than 11,600 controllers with PID control structures used in various industrial processes, with more than 97% of feedback loops using a PID control algorithm [6]. The purpose of the study is to conduct a comparative analysis of the obtained results of modeling and launching real equipment using PID control for synchronizing two drive shafts using incremental encoders and frequency converters, as well as to formulate recommendations for improving the accuracy and stability of the synchronization system.

1. Theoretical Background

This section describes the theoretical principles underlying the system under consideration. It describes the concepts of synchronizing rotating

shafts, the operating principle and design of measuring sensors and frequency converters, and the operating algorithm used to achieve synchronous shaft rotation.

Shaft synchronization involves maintaining a given relationship between their angular velocities or angular positions. Synchronization by angular velocity requires the angular velocities of rotating shafts to be identical or proportional, and is used to ensure a constant relative position of the mechanical component. Synchronization by angular position requires maintaining a constant difference in angular positions, and is used for precise positioning of the mechanical component. This paper addresses the problem of maintaining a zero difference in the angular velocities of rotating shafts:

$$\omega_1 - \omega_2 = 0, \quad (1)$$

where ω_1, ω_2 is angular speeds of shafts, rpm.

To maintain this relationship under external disturbances, such as changing loads or friction, an automated control system is required to adjust the speed of the driven shaft, in this case the drive shaft.

One of the most common sensors used to determine angular position and measure rotational speed is the incremental encoder. Its operating principle is based on converting mechanical rotation into a sequence of electrical signals [7].

The incremental encoder generates two main signals, A and B, and a zero signal, Z. Signals A and B are identical in frequency but are offset relative to each other by one-quarter of a period [8]. This offset allows the direction of shaft rotation to be determined, and pulse counting determines the angular velocity. Signal Z generates one pulse for each complete shaft revolution.

The system under consideration will utilize two incremental encoders with a 100-pulse-per-revolution rate, each with A and B signals. This requires four high-frequency inputs. The system will utilize a Siemens S7-1214 PLC, whose first six discrete inputs are high-frequency, with a range of up to 100 kHz. The encoder-PLC connection diagram is shown in Figure 1.

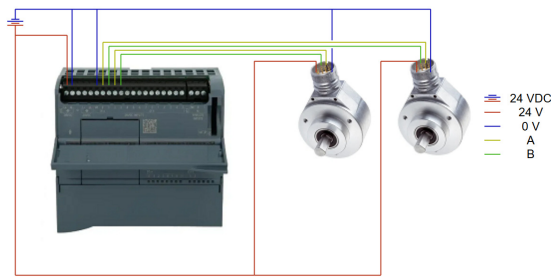


Figure 1. Connection diagram of the encoders to the PLC
Source: by M.I. Kukharskii.

Frequency converters are used to control asynchronous motors using a PLC. They are used to engage and regulate speed. In the system under consideration, gearmotors are controlled using scalar control (U/f), a method that maintains a constant voltage-to-frequency ratio. The motor shaft speed is estimated based on the frequency of the voltage across its windings [9].

One of the functions of frequency converters is soft starting — gradually increasing and decreasing the frequency. For the driving shaft, the ramp-up time is 5 seconds, and the ramp-down time is 7 seconds. For the driven shaft, the ramp-up and ramp-down time is 1 second. Slow acceleration and deceleration of the driving shaft are required for smooth operation, while the driven shaft must have high response speed to quickly reduce the desynchronization value to zero.

Communication between the PLC and frequency converters will occur using the industrial RS-485 Modbus RTU communication protocol [10]. To ensure rapid change of the setpoint (speed reference) of the frequency converter on the driven shaft, a pulse input must be used. In the Siemens S7-1214 PLC, the first four discrete outputs are pulse outputs. Rapid startup and shutdown of each frequency converter is also required. The connection diagram for the Danfoss FC51 frequency converters and the PLC is shown in Figure 2.

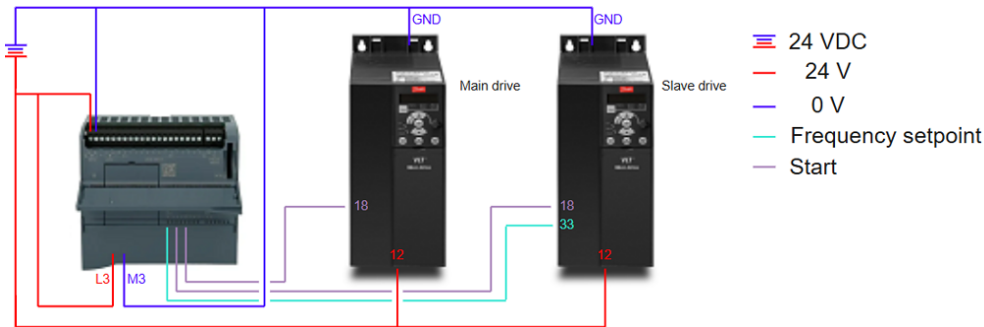


Figure 2. Connection diagram of the frequency converter to the PLC
Source: by M.I. Kukharskii.

The PID controller is a feedback algorithm in automatic control theory, widely used in industrial automation. It is designed to minimize the error between the actual value and the desired one (setpoint). This algorithm calculates the control action using three components: the proportional component (P) — the greater the error, the greater the proportional contribution; the integral component (I) — eliminates the steady-state error, accumulating it over time; the differential component (D) — predicts the future error, reduces overshoot and oscillations [11, pp. 64–70].

The Tia Portal V17 software is used for the Siemens PLC program. This software contains a large number of built-in libraries, including the PID controller in the PID_Compact function [12]. The controller will be tuned manually using an iterative method by changing the following parameters of the process object: K_P — proportional coefficient; T_I — integration time; T_D — differentiation time; prop_weight — proportional component weight; sampling_time — control action calculation frequency. The combination of the high performance of the S7-1200 series PLC,

the rapid adjustment of PID controller parameters in real time, and the empirical approach will allow for the rapid and accurate determination of optimal controller coefficients for the mathematical model, significantly reducing the time it takes to commission a real system.

2. Implementation and Testing of a Mathematical Model in the Tia Portal V17 Environment

The mathematical model for synchronizing two shafts is based on the characteristics of real equipment, namely, the motor nameplates and gear ratios of the gearboxes specified by the manufacturers of this equipment. The shaft speed of the driven motor is 900 rpm at 50 Hz, the gearbox ratio is 40. The shaft speed of the leading motor is 1400 rpm, the gearbox ratio is 8.98. However, this spiral conveyor is designed in such a way that the leading motor drives the cardan system, and the cardan drives the belt itself. Therefore, for the leading motor, it is necessary to take into account the gearbox ratio of the cardan, which is 7.97. To find the number of shaft revolutions that set the spiral conveyor in motion at a speed of 50 Hz, it is necessary to use formulas (2) [13]:

$$N_{\text{shaft}} = \frac{N_{\text{motor}}}{N_{\text{gear ratio}} \cdot N_{\text{cardan}}}, \quad N_{\text{cardan}} > 0;$$

$$N_{\text{shaft}} = \frac{N_{\text{motor}}}{N_{\text{gear ratio}}}, \quad N_{\text{cardan}} = 0. \quad (2)$$

Substituting the motor and gearbox parameters into expression (2), we obtain the following data: leading motor shaft speed 19.56 rpm, driven motor shaft speed 22.5 rpm.

The mathematical model assumes a linear relationship between shaft speed and frequency converter frequency.

The calculation of the number of shaft revolutions is performed in a cyclic interrupt block with an execution period of $T = 10$ ms. This requirement is due to the need for a constant time between calculations, which is a prerequisite for minimizing errors for the correct operation of the

system as a whole. The number of revolutions is calculated using the formula

$$N[k] = N[k-1] + \Delta N, \quad (3)$$

where ΔN — shaft increment per 10 ms.

As the increment time increases, the error begins to enlarge, leading to a decrease in the accuracy of the instantaneous shaft position. To calculate the ΔN increment, the current shaft speed, measured in rpm, is used:

$$\Delta N = \frac{N_{\text{shaft}}}{60 \cdot 100}. \quad (4)$$

Formula (4) represents the fraction of a revolution completed by the shaft in 10 ms, which is accumulated in the counter, forming the precise absolute shaft position.

Incremental encoders have a resolution of 100 pulses per revolution. The conversion of the absolute shaft position into an encoder pulse counter occurs according to the expression

$$N[k]_{\text{encoder}} = N[k]_{\text{shaft}} \cdot 100. \quad (5)$$

The resulting integer value for the number of pulses $N[k]_{\text{ЭИК}}$ allows for a highly accurate simulation of the signals that a real encoder would generate with output signals A and B . These signals and the total number of pulses are necessary for the synchronization algorithm to operate.

Smooth start and stop are standard features of modern frequency converters. These functions reduce dynamic loads on mechanical components and eliminate sudden speed jumps. Incorporating these characteristics into the mathematical model is necessary for evaluating dynamic processes close to practical ones, as well as for correctly tuning the PID controller.

To simulate these functions, a model of output frequency changes was developed. The algorithm is implemented in a cyclic interrupt block with an execution period of $T = 10$ ms. The model is based on the assumption that the time to reach a set speed is linearly dependent on its magnitude. The set acceleration time corresponds to the time it takes to reach maximum speed from zero; to reach an

arbitrary set speed, the time required is directly proportional to the ratio of the set speed to the maximum speed.

The speed increment over a 10 ms time is calculated using the following formula:

$$\Delta f = \frac{100}{t \cdot 100} = \frac{1}{t}, \quad (6)$$

where t — specified acceleration/deceleration time.

To solve the problem of synchronizing two rotating shafts, a function block from the built-in “PID_Compact” library was used in the TIA Portal development environment. “PID_Compact” is an optimized implementation of a PID controller adapted for Siemens PLCs and includes the necessary functions for stable operation.

The “PID_Compact” process object was configured by adjusting the following parameters: K_P — proportional coefficient value; T_I — integration time; T_D — differentiation time; $prop_weight$ — proportional component weight; $sampling_time$ — PID controller algorithm calculation time.

2.1. Tuning using the CHR method

To tune the PID controller parameters using the Chin-Hrones-Reswick method, it is necessary

to determine the delay time L and the equalization time T [14].

The desired transient response curve is shown in Figure 3.

In this system, the $sampling_time$ parameter is always equal to 0.1 s, and the speed increases linearly, so the delay time is equal to this parameter.

Based on the readings in graph 3, with a step effect of 40%, this time is equal to 0.152 s.

To calculate the PID controller parameters, use the formulas presented in Table 1 [15].

Table 1. Formulas for calculating PID controller parameters using the CHR method

K_p	T_i	T_d
$0,95 \times T/L$	$2,4 \times L$	$0,42 \times L$

Source: by M.I. Kukharskii.

PID controller parameters: $K_p = 1.444$, $T_i = 0.24$, $T_d = 0.042$; the transient process is shown in Figure 4.

The CHR method showed unsatisfactory control quality: the control time, approximately equal to 60 s, as well as significant overshoot, require manual fine-tuning of the PID controller parameters.

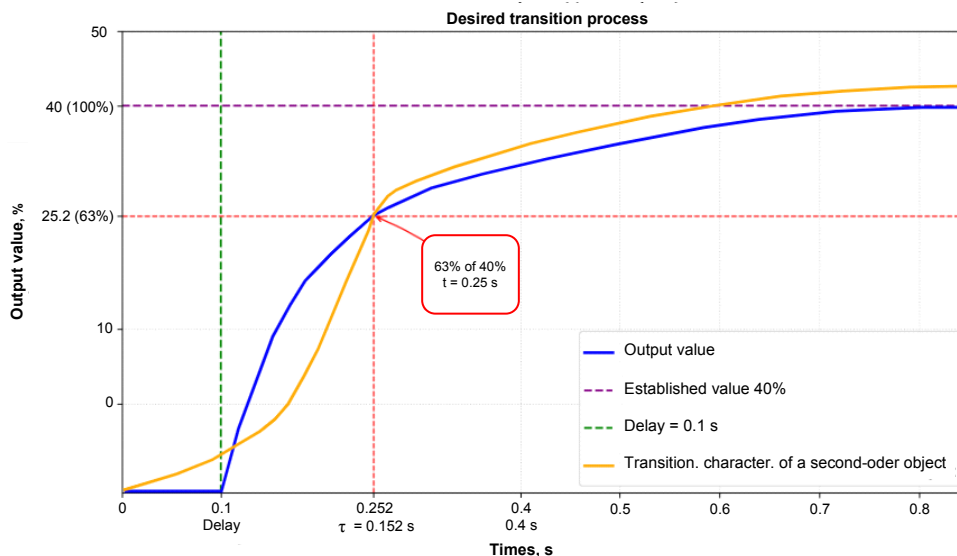


Figure 3. Desired transition process

Source: by M.I. Kukharskii.

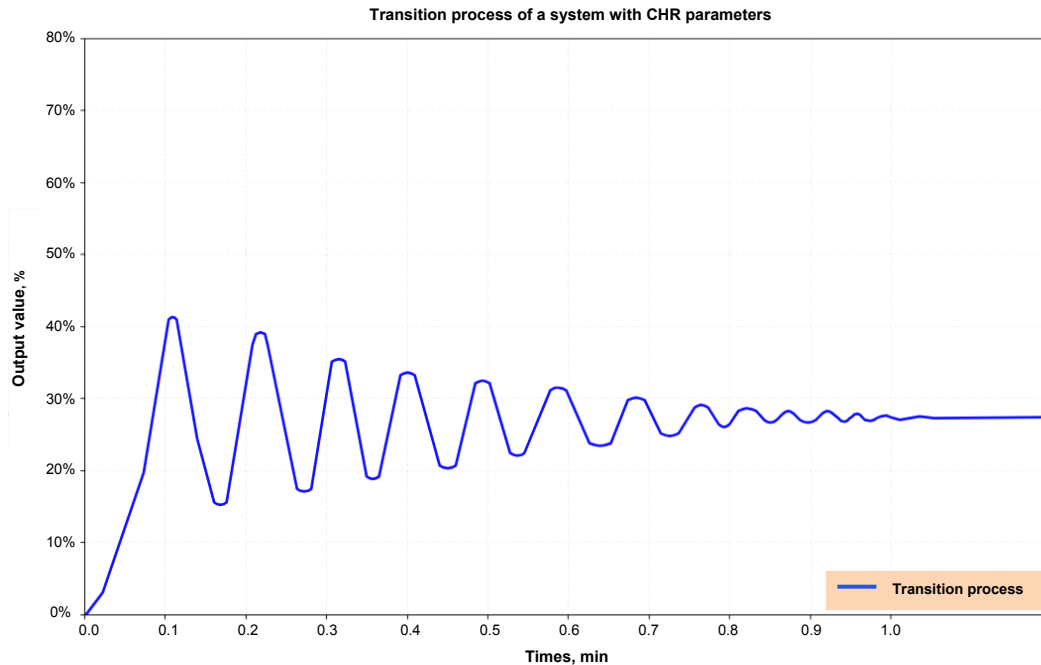


Figure 4. Transient process of the PID controller of the mathematical model with parameters of the CHR method
Source: by M.I. Kukharskii.

2.2. Setting up using an Empirical Iterative Method

The tuning involved selecting optimal parameters with visual inspection of the transient response of the implemented mathematical model.

At the initial stage, the K_P parameter was adjusted with the integral and differential components disabled, resulting in a value of 9.7. This proportional value is necessary to ensure a strong control value even with small desynchronization values.

The second step in tuning the controller was introducing an integral component, T_I , equal to 1 s. This value allows for the accumulation of the corrective action necessary to compensate for disturbances without causing a slowdown in the transient process.

The next step was adjusting the differential component to suppress oscillations, $T_D = 0.1$. With a given differential component value, the system demonstrates overall stability.

The fourth step was selecting the proportional component weight, $\text{prop_weight} = 0.3$. This con-

figuration is necessary to reduce the abruptness of the response to a jump in the speed reference and ensure smooth operation.

The `sampling_time` parameter is set to 0.1 to ensure tight coupling to the main program execution loop.

The transient process is shown in Figure 5.

The control time is 5.5 seconds, which meets the requirements of the task, taking into account the system's inertia. The resulting overshoot value of 7% is optimal for industrial systems. Minor damped oscillations of 3–4% are also present before the control time expires. The desynchronization value did not exceed 3, and after the control time expired after system startup, it became static and equal to zero.

The resulting parameter configuration meets the requirements for speed, stability, and smooth operation of the slave frequency converter, taking into account its dynamic properties. These PID controller parameters, obtained using the mathematical model, will form the basis for implementing synchronization in the real system.

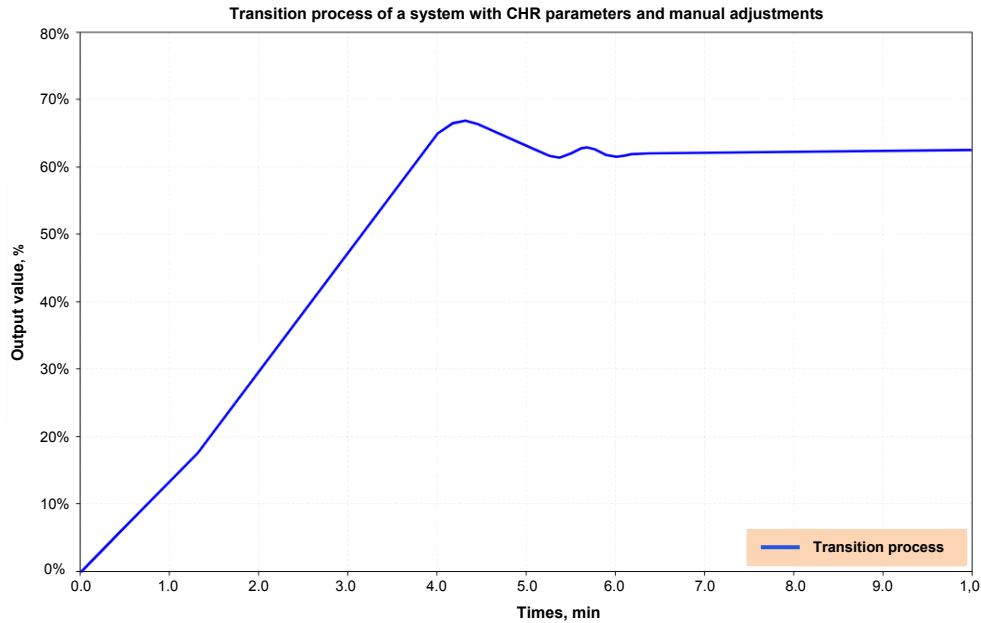


Figure 5. Transient process of the PID controller of the mathematical model with parameters of the empirical method
 Source: by M.I. Kukharskii.

3. Implementation and Testing of a Real System

3.1. Commissioning Works

The PID controller parameters obtained from the mathematical model were integrated into the real system. However, unaccounted for nonlinearities,

such as soft stop and start, as well as actuator errors, resulted in system oscillations without a steady-state value.

Empirical tuning yielded the final PID controller parameters: $K_P = 6$; $T_D = 0.195$. The transient process is shown in Figure 6.

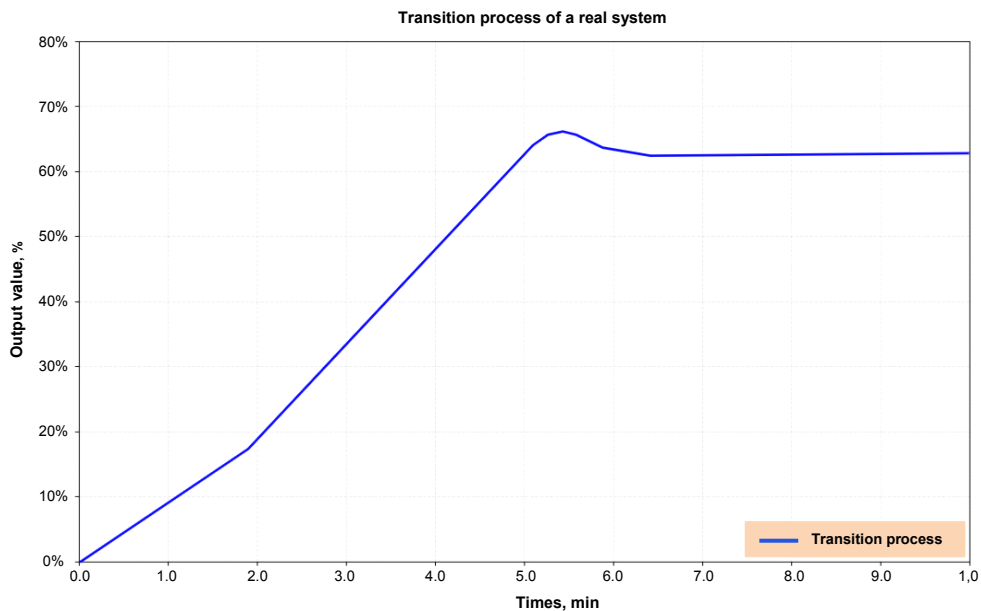


Figure 6. Transient process of a PID controller for a real system
 Source: by M.I. Kukharskii.

As a result, the integral component retained its previous value, and despite a slight increase in the control time to 7 seconds, it is acceptable for this process, taking into account the 7-second soft start of the drive shaft. Overshoot decreased to 6%, and the increase in the differentiation time reduced the amplitude of the damped oscillations to 2%. The desynchronization value did not exceed 2, and after the control time had elapsed after system startup, it became static and equal to zero.

The system demonstrates smooth and stable transient processes, confirming its readiness for operation in the industrial setting.

3.2. Recommendations for Accuracy Improvement

In order to improve the accuracy of the synchronization system, it is advisable to replace existing encoders with 100 pulses per revolution (PPR) characteristics with encoders with a higher pulse count (500, 1000), which will reduce the position error of the driven shaft [16].

Special attention should be paid to the hardware — replacing frequency converters with servo drives and using encoders integrated into the servo drives. It is important to note that servo drives control not only the shaft speed but also the precise angular position of the rotor, which ensures greater dynamics and rigidity [17]. Servo drives allow for instantaneous response to disturbances and maintain precise phase relationship between the shafts [18–19].

4. Comparative Analysis of the Dynamic Characteristics of a Real System and a Mathematical Model

The transition from the mathematical model to the real system required adjustments to the PID controller, which affected the system's dynamic characteristics. A comparative analysis is presented in Table 2.

The need to reduce the proportional component indicates a higher sensitivity of the real system than predicted by the mathematical model. This is due to the presence of nonlinearities in the real system, arising from friction, backlash, and nonlinearities in smooth starting and stopping.

Table 2. Comparison of parameters

Parameter	Mathematical model	Real system
K_P	9.7	6
T_D, c	0.1	0.195
Regulation time, s	5.5	7
Overshoot, %	7	6
The amplitude of the oscillations, %	3–4	<=2

Source: by M.I. Kukharskii.

The real system contains additional delays, such as shaft stiffness during rotation and signal processing delays in the frequency converter. To compensate for these, the differentiation time was significantly increased by almost 2 times.

After adjusting the parameters, the control time increased by 1.5 seconds to 7 seconds, while reducing the overshoot to 6%. The increase in control time remains within the technological limits of the drive shaft acceleration process, without negatively affecting the process.

A direct consequence of increasing the differentiation time is a reduction in oscillation amplitude from 3–4% to 2%, indicating increased system stability.

Adjusting the PID controller parameters is a natural and mandatory requirement when transitioning from a mathematical model to a real system. The final parameters should be considered optimal for the given operating conditions due to the system demonstrating a shaft desynchronization value equal to zero, acceptable speed of response and high stability corresponding to the requirements of the synchronization process of two shafts of a spiral conveyor.

Conclusion

The study successfully developed a mathematical model and launched a real-world synchronization system for two spiral conveyor shafts based on a Siemens S7-1214 programmable logic controller. Transitioning from the mathematical model to practical implementation enabled the creation of a robust control system that meets the requirements of real-world operating conditions.

The transient response graph confirms the controller's effectiveness: the control time does

not exceed the drive shaft's acceleration time, and overshoot does not exceed 7%. The practical significance of this work lies in the development of a methodology for adapting the mathematical model under ideal conditions to real-world industrial equipment, taking into account its nonlinearities and errors.

Prospects for further research include expanding the functionality to a system with a larger number of shafts and optimizing the system for operation with variable loads. Further development of the synchronization system involves implementing recommendations for replacing frequency converters and separate encoders with servo drives with integrated encoders capable of delivering a higher number of pulses per shaft revolution. The system presented in this study can be successfully implemented in related areas of industrial automation that require synchronization of rotational movements.

References

1. Pazdnikova AA. Methods of manual PID controller tuning. *Day of Science*; 2025 Mat 13; Blagoveshchensk. Blagoveshchensk: Amur State University; 2025. p. 120–121. EDN: RNWOVX
2. Hryniuk DA, Oliferovich NM, Suhorukova IG, Orobei IO. PID-controller tuning through deadbeat regulator with various integral criteria. *Actual problems of science and technology: Proceedings of the I Interuniversity Scientific and Technical Conference with international participation dedicated to the 75th anniversary of Victory in the Great Patriotic War and to the 100th anniversary of the beginning of the production of aviation equipment in Sarapul*. Sarapul; 2020. p. 258–265. (In Russ.) EDN: LSIIQI
3. Nguyen VK, Tran VK, Pham H, Nguyen, HD, Nguyen CN. Design and implementation of fuzzy-based fine-tuning PID Controller for Programmable Logic Controller. *International Journal of Integrated Engineering*. 2024;16(5):359–372. <https://doi.org/10.30880/ijie.2024.16.05.027>
4. Cha JH, Roh MI, Lee KY. Dynamic response simulation of a heavy cargo suspended by a floating crane based on multibody system dynamics. *Ocean Engineering*. 2010;37(14–15):1273–1291. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.06.008>
5. Hong JW, Roh MI, Ham SH, Ha S. Dynamic simulation of subsea equipment installation using an offshore support vessel based on flexible multibody system dynamics. *Journal of Marine Science and Technology*. 2016;24(4):807–821. <https://doi.org/10.6119/JMST-016-0323-1>
6. Desborough L, Miller R. Increasing customer value of industrial control performance monitoring — honeywell's experience. *AIChE Symposium Series*. 2002;326:169–189.
7. Ulyashev AE, Starcev AE. Mathematical model of incremental encoder. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2025;(4):102–106. (In Russ.) EDN: YLYDVE
8. Keldibekov ZhK, Yakovlev SG, Gorbachenko IM. Development of Software for Controlling a Ventilation and Filtering Unit with an EtherCAT Bus. *Science and Innovations in the Modern World*. 2020;5:127–131. (In Russ.) EDN: PKYQHA
9. Khudier KH, Mohammed KG, Ibrahim MS. Design and implementation of constant speed control system for the induction motors using programmable logic controller (PLC) and variable frequency drive (VFD). *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. Diyala, Iraq, 2021;1076(1):012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1076/1/012007>
10. Marzuki A, Muzakkir T, Arief MS. Three-phase induction motor control and monitoring using VFD and ESP32 based on modbus RTU protocol. *American Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2024;8(2):71–80. <https://doi.org/10.11648/j.ajece.20240802.15>
11. Åström KJ, Hagglund T. *PID controllers, 2nd Edition*. USA: Instrument Society of America; 1995. ISBN 1-55617-516-7
12. Genctor SB, Soydemir MU, Sahin S. Design of a process control experimental setup for temperature control with PID controller using TIA portal. *13th International Conference on Applied Sciences*. Izmir Katip Celebi University; 2025. p. 1073–1086. ISBN 978-625-5962-78-2
13. Yao Z, Lin T, Chen Q, Ren H. Dynamic response of electromechanical coupled motor gearsystem with gear tooth crack. *Machines*. 2024;12(12):918. <https://doi.org/10.3390/machines12120918>
14. Bashishtha TK, Singh VP. Chien-Hrones-Reswick method-based PID control strategy for mitigation of frequency deviation of islanded microgrid. *Electrical Engineering*. 2025;107:8085–8099. <https://doi.org/10.1007/s00202-025-02959-2>
15. Singh A, Yadav S, Tiwari N, Nishad DK, Khalid S. Model order reduction of boiler system using nature-inspired metaheuristic optimization of PID controller. *Discover Applied Sciences*. 2025;7(5):402. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06927-0>
16. Robinson LB, Kibrick RI, Cowley DJ, Osborne J. Tests of incremental rotary encoders. *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*. San Diego, CA, United States, 1997;3112. <https://doi.org/10.1117/12.278837>

17. Kalyashina AV, Smirnov YuN. Study of proportional control process of industrial robot servo drive. *Herald of Technological University*. 2025;28(5):99–104. https://doi.org/10.55421/3034-4689_2025_28_5_99 EDN: SYLNRX

18. Polyuschenkov IS. Development of servo electric drive with vector control of brushless alternating current

motor. *Vestnik IGEU*. 2025;(5):68–80. (In Russ.) <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2025.5.068-080> EDN: GCHDVI

19. Tarczewski T, Grzesiak LM, Lisiński H. Performance analysis of PMSM servo-drive with state feedback and hybrid position controllers. *Power Electronic Devices and Components*. 2025;12;100116. <https://doi.org/10.1016/j.pedc.2025.100116>

About the authors

Mikhail I. Kukharskii, Master's student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-4813-6051; e-mail: mkukharskii@mail.ru

Anton O. Zhuravlev, PhD student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 4134-6061, ORCID: 0009-0002-2900-6767; e-mail: 1142220875@rudn.ru

Denis A. Andrikov, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, 5, bldg 1, 2nd Baumanskaya St, Moscow, 105005, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8247-7310; ORCID: 0000-0003-0359-0897; e-mail: andrikovdenis@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-2-237-248

EDN: LBPGSQ

Научная статья / Research article

Анализ возможности аналитической и численной суперпозиции нелинейных нагрузочных диаграмм спирально-тросовых виброизоляторов

С.В. Доронин^{id}✉, Е.М. Рейзмунт^{id}, Ю.Ф. Филиппова^{id}

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,

Красноярск, Российская Федерация

✉ mr.svdoronin@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 15 декабря 2025 г.

Доработана: 18 февраля 2026 г.

Принята к публикации: 22 февраля 2026 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта

При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Аннотация. В силу ограниченного числа направлений нагружения тросовых виброизоляторов, обеспеченных экспериментальными характеристиками жесткости, актуальным является разработка технологии их расчетного обоснования. Анализ большого массива экспериментальных нагрузочных диаграмм тросовых виброизоляторов различных типоразмеров и производителей позволил установить качественные закономерности нелинейности жесткости. Одна из них заключается в уменьшении степени нелинейности диаграмм виброизоляторов, рассчитанных на большие нагрузки. Цель исследования — проверка гипотезы о возможности применения принципа суперпозиции экспериментальных нелинейных нагрузочных диаграмм с контролируемой и практически приемлемой погрешностью. Исследованы возможности получения расчетных нагрузочных диаграмм модельного тросового виброизолятора для произвольного направления приложения нагрузки путем аналитической и численной суперпозиции имеющихся паспортных (экспериментальных) нагрузочных диаграмм. Численная суперпозиция осуществлялась с использованием конечно-элементного представления тросового виброизолятора пространственной системой нелинейных пружин. Полученные оценки погрешности не позволяют в общем случае использовать принцип суперпозиции для инженерных расчетов, несмотря на слабо выраженный характер нелинейности паспортных диаграмм. Однако для тросовых виброизоляторов, рассчитанных на большие нагрузки, применение принципа суперпозиции для вычисления расчетных нагрузочных диаграмм представляется потенциально перспективным.

Ключевые слова: принцип суперпозиции, нелинейность жесткости, модели тросового виброизолятора, статический расчет, паспортные нагрузочные диаграммы

Вклад авторов

Доронин С.В. — концепция, методология исследования, написание текста, анализ и интерпретация результатов; *Рейзмунт Е.М.* — построение и исследование аналитических и численных моделей, написание текста, анализ и интерпретация результатов; *Филиппова Ю.Ф.* — систематизация, оцифровка, анализ нелинейности нагрузочных диаграмм, написание текста. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

© Доронин С.В., Рейзмунт Е.М., Филиппова Ю.Ф., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

Для цитирования

Доронин С.В., Рейзмут Е.М., Филиппова Ю.Ф. Анализ возможности аналитической и численной суперпозиции нелинейных нагрузочных диаграмм спирально-тросовых виброизоляторов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 2. С. 237–248. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-237-248> EDN: LBPQSQ

Analysis of the Feasibility of Analytical and Numerical Superposition of Nonlinear Load-Deflection Curves of Helical Wire-Rope Vibration Isolators

Sergey V. Doronin[✉], Elena M. Reizmunt^{id}, Yulia F. Filippova^{id}

Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Krasnoyarsk, Russian Federation

✉ mr.svdoronin@yandex.ru

Article history

Received: December 15, 2025

Revised: February 18, 2026

Accepted: February 22, 2026

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability

All data obtained during this study are included in the published article.

Abstract. Due to the limited number of loading directions for wire-rope vibration isolators for which experimental stiffness characteristics are available, the development of a computational procedure for substantiating their characteristics is relevant. An analysis of a large set of experimental load-deflection curves for wire-rope vibration isolators of various standard sizes and manufacturers made it possible to identify qualitative patterns of stiffness nonlinearity. One such pattern is a decrease in the degree of nonlinearity in the curves of vibration isolators designed for higher loads. The aim of this study is to test the hypothesis that the superposition principle can be applied to experimental nonlinear load-deflection curves with controlled and practically acceptable error. The study investigates the feasibility of obtaining calculated load-deflection curves for a model wire-rope vibration isolator under an arbitrary direction of load application through analytical and numerical superposition of the available manufacturer-specified experimental load-deflection curves. Numerical superposition was performed using a finite element representation of the wire-rope vibration isolator as a three-dimensional system of nonlinear springs. The obtained error estimates do not, in the general case, allow the superposition principle to be used for engineering calculations, despite the weakly pronounced nonlinearity of the manufacturer-specified curves. However, for wire-rope vibration isolators designed for higher loads, the use of the superposition principle to calculate design load-deflection curves appears potentially promising.

Keywords: superposition principle, non-linearity of stiffness, wire rope isolator models, static calculation, passport load diagrams

Authors' contribution

Doronin S.V. — conceptualization, research methodology, manuscript preparation, analysis and interpretation of results; *Reizmunt E.M.* — development and studying of analytical and numerical models, manuscript preparation, analysis and interpretation of results; *Filippova Yu.F.* — systematization, digitization, analysis of the nonlinearity of load diagrams, manuscript preparation. All authors read and approved the final version of the article.

Funding

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for the Federal Research Center for Information and Computing Technologies.

For citation

Doronin SV, Reizmunt EM, Filippova YuF. Analysis of the feasibility of analytical and numerical superposition of nonlinear load-deflection curves of helical wire-rope vibration isolators. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(2):237–248. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-237-248> EDN: LBPQSQ

Введение

Спирально-тросовые виброизоляторы представляют собой класс технических устройств, широко применяемых в системах защиты от динамических воздействий. Основной характеристикой этих устройств являются экспериментально получаемые паспортные нагрузочные диаграммы, выражающие взаимосвязь нагрузки (силы) F , приложенной к одной из планок, и перемещения s этой планки в направлении действия нагрузки. Нагрузочные диаграммы являются характеристикой жесткости виброизолятора и, как правило, получаются для 2–4 (гораздо реже для 6) направлений действия нагрузки, лежащих преимущественно в одной, реже в двух или трех плоскостях. То есть нагрузочные диаграммы имеются для весьма ограниченного числа направлений действия сил.

Практически важным для инженерного проектирования систем защиты от динамических воздействий представляется получение нагрузочных диаграмм виброизоляторов для произвольного направления действия силы. Ранее была предпринята попытка синтеза диаграмм для произвольного направления действия силы путем интерполяции паспортных (экспериментальных) и расчетных диаграмм, полученных с использованием линеаризованной трехмерной модели виброизолятора [1]. В развитие этих результатов в настоящей работе рассматривается более общий подход, основанный на качественных оценках степени нелинейности нагрузочных диаграмм, оценке возможности применения принципа суперпозиции и использовании аналитических расчетов и численного моделирования виброизолятора пространственной системой пружин.

Предпосылкой исследования возможности применения принципа суперпозиции для расчетного построения нагрузочных диаграмм при произвольном направлении действия нагрузки по имеющемуся ограниченному набору паспортных нагрузочных диаграмм является тот факт, что во многих случаях нагрузки, приложенные по некоторым направлениям, могут

быть выражены геометрической суммой проекций силы на оси, соответствующие другим направлениям нагрузки. Согласно принципу суперпозиции результирующий эффект от нескольких независимых воздействий представляет собой сумму эффектов, вызываемых каждым воздействием в отдельности [2].

Известны многочисленные случаи успешного использования этого принципа для решения прикладных задач [3–6]. Область его применения ограничивается тем, что его справедливость обоснована только для линейных систем, при наличии нелинейности любой природы принцип суперпозиции формально неприемлем [2]. Однако использование принципа суперпозиции настолько практически эффективно, что выполняются исследования, направленные на оценку погрешности решения, полученного путем суперпозиции для нелинейных задач [7–10]. Они основаны на идее, что в случае слабой нелинейности суперпозиция решений предположительно приведет к небольшой ошибке, и при возможности оценки и контроля этой ошибки применение принципа суперпозиции может быть практически оправданно. При этом возникает вопрос об оценке степени нелинейности рассматриваемой системы.

В рамках формального, строго математического подхода в наиболее общем случае в качестве характеристики степени нелинейности рассматриваются показатели степени уравнений, описывающих модель системы [11–14]. При анализе степени нелинейности регрессионных моделей учитываются их монотонность или наличие экстремумов, суммарное число экстремумов и перегибов, наличие либо отсутствие асимптоты и другие характеристики [15].

С этих позиций представляется актуальным анализ нелинейности нагрузочных диаграмм спирально-тросовых виброизоляторов и возможности применения принципа суперпозиции для их вычисления при произвольном направлении действия нагрузки.

Гипотеза настоящего исследования заключается в том, что степень нелинейности, характерная для тросовых виброизоляторов, не пре-

пятствует построению расчетных нагрузочных диаграмм с использованием принципа суперпозиции с практически приемлемой погрешностью. При этом степень нелинейности будет оцениваться преимущественно качественно по внешнему виду нагрузочных диаграмм.

Постановка задачи включает в себя разработку алгоритмов аналитического и численного получения нагрузочной диаграммы при статическом нагружении тросового виброизолятора по произвольному направлению путем суперпозиции имеющихся паспортных нагрузочных диаграмм, а также оценку погрешности результатов, полученных с использованием этих алгоритмов.

1. Анализ степени нелинейности паспортных нагрузочных диаграмм

В качестве исходных данных для анализа использованы паспортные нагрузочные диаграммы из размещенных в открытом доступе в сети Internet каталогов продукции ведущих производителей тросовых виброизоляторов: Hutchinson Stop-Choc GmbH (Германия), Socitec (Франция), Enidine (США), Wuxi Hongyuan Devflex Co. Ltd (Китай), Астрон (Россия), Виброника (Россия), ИНМОП (Россия)¹. Для возможности многовариантного компьютерного анализа часть этих диаграмм оцифрована и представлена в виде электронных таблиц. Оцифрованы нагрузочные диаграммы 11 типоразмеров виброизоляторов компании Виброника, 27 типоразмеров виброизоляторов компании Астрон, 5 типоразмеров виброизоляторов корпорации Hutchinson, 90 типоразмеров виброизоляторов компании Enidine.

Качественный анализ рассматриваемого массива нагрузочных диаграмм позволил установить следующие их характерные особенности. Графики нагрузочных диаграмм всегда мо-

нотонны и преимущественно нелинейны, причем во многих случаях значительные фрагменты графиков визуально близки к линейным.

Существенным для целей настоящего исследования является тенденция изменения характера нелинейности диаграмм в зависимости от максимальной расчетной нагрузки на виброизолятор (грузоподъемности). Проиллюстрируем это положение на примере нагрузочных диаграмм трех типоразмеров виброизоляторов компании Астрон (рис. 1). Для виброизолятора ВМТ-04-01 с максимальной нагрузкой до 90 Н диаграммы для всех схем нагружения существенно нелинейны, для виброизолятора ВМТ-350 с максимальной нагрузкой до 4000 Н одна диаграмма существенно нелинейна, две могут считаться слабо нелинейными, для виброизолятора ВМТ-700 с максимальной нагрузкой до 14000 Н все три диаграммы практически линейны.

Для конкретизации дальнейших рассуждений выбран модельный объект — тросовый виброизолятор ВМТ-350, являющийся типичным по конструкции и характеру нагрузочных диаграмм представителем рассматриваемого класса технических устройств и характеризующийся диаграммами различной степени нелинейности. Невыполнение гипотезы исследования для этого виброизолятора будет как ее опровержением для всего класса тросовых виброизоляторов, так и основанием определения направлений дальнейших исследований.

Визуально нелинейность заметно выражена у кривой 1, кривые 2 и 3 близки к линейным (рис. 1, в). Выполнена аппроксимация оцифрованных графиков нагрузочных диаграмм различными вариантами степенных полиномов с оценкой коэффициента детерминации R^2 , характеризующего долю дисперсии зависимой переменной, объясняемую независимой переменной. Высокая точность аппроксимации дос-

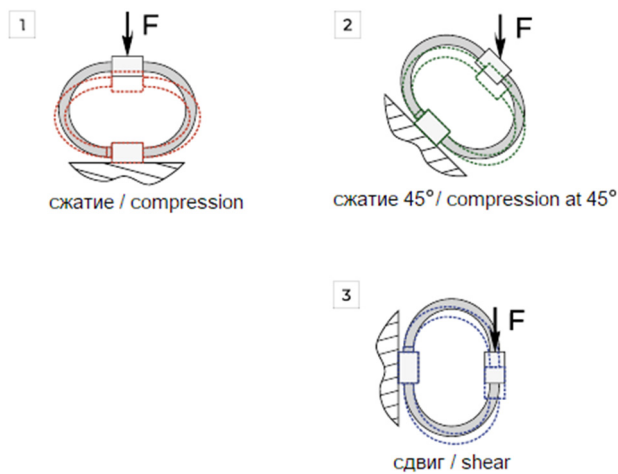
¹ См.: Hutchinson. URL: <https://stop-choc.de> (accessed: 25.09.2025); Socitec. Socitec's expertise & creative solutions. URL: <https://socitec.com/> (accessed: 25.09.2025); Enidine. Shock Absorbers and Vibration Isolation Products. URL: <https://www.enidine.com> (accessed: 25.09.2025); Dpflex. URL: <https://en.dpflex.com/> (accessed: 26.09.2025); Астрон. Виброизоляция электроники на транспорте. URL: <https://dempfer.ru> (accessed: 25.09.2025); Виброника. Вибрационная защита оборудования. URL: <http://vibronika.ru/> (дата обращения: 26.09.2025); ИНМОП. URL: <http://inmog.ru/> (дата обращения: 02.10.2025).

тигнута уже при третьей степени полинома. Соответствующие выражения $F = f(s)$ для кривых 1–3 имеют вид

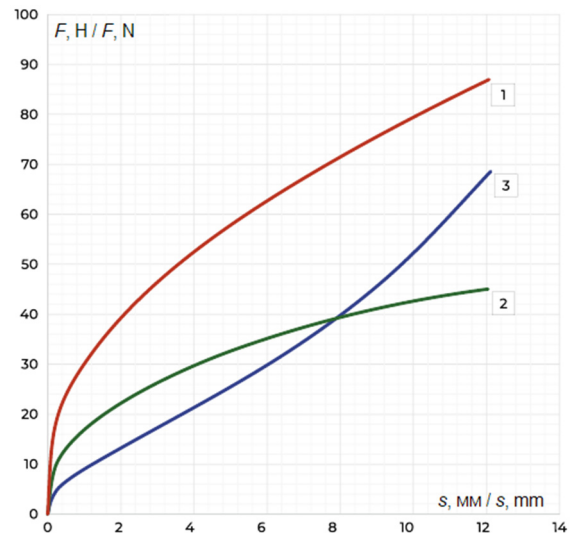
$$F = f_1(s) = 0,2979s^3 - 16,742s^2 + 376,29s, \\ R^2 = 0,9965; \quad (1)$$

$$F = f_2(s) = 0,1097s^3 - 6,0865s^2 + 160,14s, \\ R^2 = 0,9973; \quad (2)$$

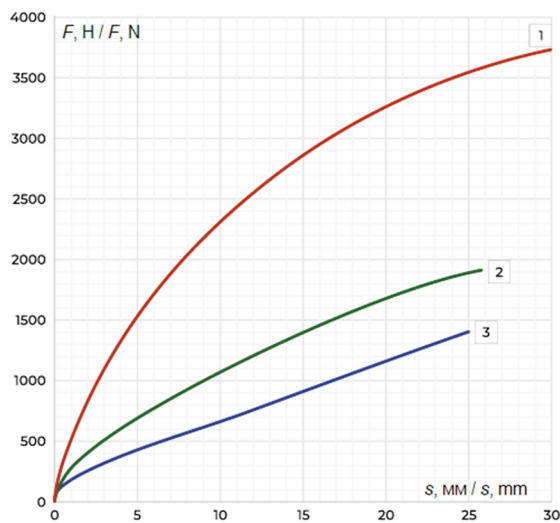
$$F = f_3(s) = 0,0807s^3 - 3,6591s^2 + 97,9075s, \\ R^2 = 0,9966. \quad (3)$$



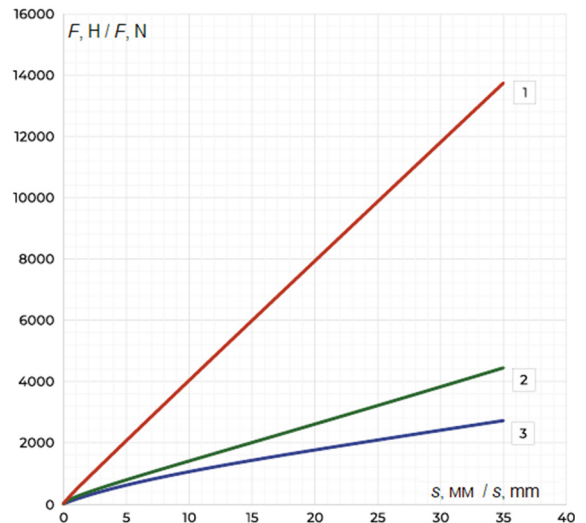
а



б



в



г

Рис. 1. Нагрузочные диаграммы виброизоляторов Астрон разных типоразмеров (по данным Астрон: <https://dempfer.ru>):

а — схемы нагружения; б — VMT-04-01; в — VMT-350; г — VMT-700

Источники: выполнено С.В. Дорониным, Е.М. Рейзмунт, Ю.Ф. Филипповой.

Figure 1. Load-Deflection Curves for Astron Vibration Isolators of Various Standard Sizes (based on Astron data: <https://dempfer.ru>)

а — load diagrams; б — VMT-14-01; в — VMT-350; г — VMT-700

Source: by S.V. Doronin, E.M. Reizmund, Yu.F. Filippova.

Таким образом, уже при третьей степени аппроксимирующего полинома более 99 % дисперсии прикладываемой силы F объясняется дисперсией перемещений s . Это косвенно свидетельствует об умеренной степени нелинейности нагрузочных диаграмм и является предпосылкой попытки применения принципа суперпозиции с обязательной оценкой погрешности получаемого результата.

Отметим, что в практических расчетах часто бывает удобно вместо прямой формы записи выражения нагрузочной диаграммы в виде $F = f(s)$ использовать соответствующую обратную функцию $s = f^{-1}(F)$. Определяя силы в зависимости от перемещения или перемещения по значениям силы, имеем дело с разными формализациями нагрузочной диаграммы.

2. Суперпозиция нагрузочной диаграммы с помощью аналитического расчета

Для оценки погрешности суперпозиции необходимы как минимум три паспортные нагрузочные диаграммы: две, на основании которых будет получена расчетная диаграмма как результат суперпозиции, и третья — с направлением действия нагрузки, идентичным таковому для расчетной. Сравнение двух последних диаграмм позволит судить о погрешности суперпозиции. Рассмотрим в качестве примера получение нагрузочной диаграммы для случая сжатия под углом 45° с помощью суперпозиции нагрузочных диаграмм для случаев сжатия и сдвига. Сила F_2 , сжимающая виброизолятор под углом 45° , может быть разложена на силы F_1 и F_3 , вызывающие деформации соответственно сжатия и сдвига (рис. 2): $\vec{F}_2 = \vec{F}_1 + \vec{F}_3$; $F_1 = F_3 = F_2 \cdot \cos 45^\circ$. Перемещения, вызываемые силами F_1 , F_2 и F_3 , вдоль направления действия сил, определяются нагрузочными диаграммами $F = f(s)$, индивидуальными для каждого направления ($F_1 = f_1(s)$, $F_2 = f_2(s)$, $F_3 = f_3(s)$). Для вычисления собственно перемещений по значениям приложенных сил необ-

ходимо получить функции $s = g(F)$, обратные к нагрузочным диаграммам $F = f(s)$. Тогда проекции перемещений, вызванных силой F_2 , на оси X , Y принятой системы координат (рис. 2), и суммарные перемещения составляют

$$s_Y^{F_2} = g_2(F_2); \quad s_X^{F_2} = 0; \quad s^{F_2} = s_Y^{F_2}. \quad (4)$$

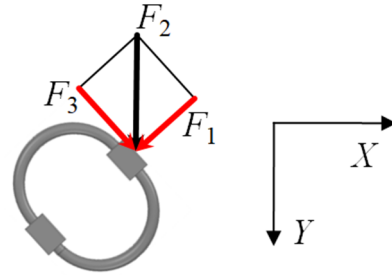


Рис. 2. Разложение силы F_2 на составляющие

Источники: выполнено С.В. Дорониным, Е.М. Рейзмут, Ю.Ф. Филипповой.

Figure 2. Resolution of force F_2 into components

Source: by S.V. Doronin, E.M. Reizmunt, Yu.F. Filippova.

Для сил F_1 и F_3 соответствующие перемещения из геометрических соображений составляют:

$$s_Y^{F_1} = g_1(F_2 \cos 45^\circ) \cos 45^\circ;$$

$$s_X^{F_1} = -g_1(F_2 \cos 45^\circ) \cos 45^\circ; \quad (5)$$

$$s_Y^{F_3} = s_X^{F_3} = g_3(F_2 \cos 45^\circ) \cos 45^\circ. \quad (6)$$

Суммарные перемещения, вызванные совместным действием сил F_1 и F_3 , в соответствии с принципом суперпозиции составляют:

$$s_Y^{F_1+F_3} = s_Y^{F_1} + s_Y^{F_3}; \quad s_X^{F_1+F_3} = s_X^{F_1} + s_X^{F_3};$$

$$s^{F_1+F_3} = \sqrt{\left(s_Y^{F_1+F_3}\right)^2 + \left(s_X^{F_1+F_3}\right)^2}. \quad (7)$$

Таким образом, перемещения $s^{F_1+F_3}$ получены в результате суммирования перемещений при независимом действии сил F_1 и F_3 . В силу нелинейности нагрузочных диаграмм величина $s^{F_1+F_3}$ не должна быть точно равна переме-

щению s^{F_2} при действии силы F_2 . Сравнение значений $s^{F_1+F_3}$ и s^{F_2} позволяет получить оценку погрешности суперпозиции для каждой точки нагрузочной диаграммы.

Конкретизируем эти построения для нагрузочных диаграмм виброизолятора ВМТ-350 (рис. 1, в).

На основании оцифрованных графиков нагрузочных диаграмм путем аппроксимации получены функции $s = g(F)$, обратные к выражениям соответственно (1)–(3):

$$s = g_1(F) = 4,4911 \cdot 10^{-10} F^3 - 4,1618 \cdot 10^{-7} F^2 + 2,7674 \cdot 10^{-3} F, \\ R^2 = 0,9931; \tag{8}$$

$$s = g_2(F) = 3,0512 \cdot 10^{-12} F^3 + 4,7785 \cdot 10^{-6} F^2 + 4,0739 \cdot 10^{-3} F, \\ R^2 = 0,9996; \tag{9}$$

$$s = g_3(F) = -6,5281 \cdot 10^{-9} F^3 + 1,7722 \cdot 10^{-5} F^2 + 5,6529 \cdot 10^{-3} F, \\ R^2 = 0,9992. \tag{10}$$

Зададимся значением $F_2 = 1500$ Н, тогда $F_1 = F_3 = 1060,7$ Н. Подставляя F_2 в (4) с учетом (9), получим $s^{F_2} = 16,87$ мм. Значения F_1 при подстановке в (5) с учетом (8) дают $s_Y^{F_1} = 2,12$ мм, $s_X^{F_1} = -2,12$ мм. Подстановка F_3 в (6) с учетом (10) приводит к значениям $s_Y^{F_3} = s_X^{F_3} = 12,83$ мм. Тогда суммарные перемещения от действия сил F_1 и F_3 в соответствии с (7) составляют $s_Y^{F_1+F_3} = 14,95$ мм, $s_X^{F_1+F_3} = 10,71$ мм, $s^{F_1+F_3} = 18,39$.

Сравнивая $s^{F_2} = 16,87$ мм и $s^{F_1+F_3} = 18,39$ мм, видим, что смещения, полученные в результате суперпозиции нагрузочных диаграмм по направлениям сжатия и сдвига, оказываются больше смещений, соответствующих паспортной нагрузочной диаграмме для сжатия под углом 45° , на 9 % $((18,39 - 16,87) / 16,87 = 0,09)$. Величину

$$\Delta_s = (s^{F_1+F_3} - s^{F_2}) / s^{F_2} 100 \% \tag{11}$$

можно считать оценкой погрешности суперпозиции, выражающей отношение длин векторов перемещений. Отметим, что векторы \vec{F}_2 и $\vec{F}_1 + \vec{F}_3$ совпадают по направлению, однако векторы перемещений s^{F_2} и $s^{F_1+F_3}$ по направлению не совпадают. Проекция перемещения $s^{F_1+F_3}$ на ось Y меньше перемещения s^{F_2} на 11% $((14,95 - 16,87) / 16,87 = -0,11)$, а угол между векторами s^{F_2} и $s^{F_1+F_3}$ составляет $\alpha = \arctg(s_X^{F_1+F_3} / s_Y^{F_1+F_3}) \approx 36^\circ$ (рис. 3). Угол α можно интерпретировать как угловую оценку погрешности суперпозиции.

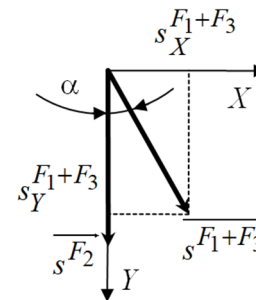


Рис. 3. Схема расчетных перемещений
Источники: выполнено С.В. Дорониным, Е.М. Рейзмунт, Ю.Ф. Филипповой.

Figure 3. Diagram of calculated displacements
Source: by S.V. Doronin, E.M. Reizmund, Yu.F. Filippova.

Результаты аналогичных расчетов, выполненных для всего диапазона рабочих усилий (за исключением области малых значений), показаны на рис. 4. Как видно, абсолютная оценка погрешности меняется в широком диапазоне (в том числе меняет знак): от -6 до 25 % с максимумом при нагрузке, составляющей примерно $0,3$ от наибольшего значения. Угловая оценка погрешности находится в диапазоне $24-36^\circ$. Поскольку все расчеты выполнены аналитически, полученные результаты иллюстрируют погрешность именно применения принципа суперпозиции к конкретной нелинейной задаче (погрешности округления пренебрежимо малы).

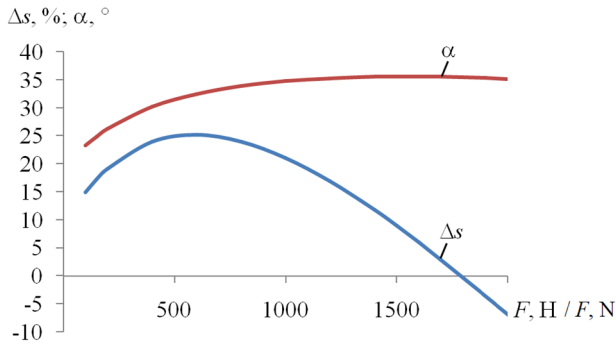


Рис. 4. Оценки погрешности аналитической суперпозиции нагрузочных диаграмм
Источник: выполнено С.В. Дорониным,
Е.М. Рейзмут, Ю.Ф. Филипповой.

Figure 4. Error Estimates for Analytical Superposition of Load-Deflection Curves

Source: by S.V. Doronin, E.M. Reizmunt, Yu.F. Filippova.

Рассматриваемые результаты получены для трех нагрузочных диаграмм, отличающихся направлением действия нагрузки с шагом 45° (0° — сжатие, 45° — сжатие под углом 45° , 90° — сдвиг).

Аналогичные построения можно выполнить для любых виброизоляторов и любых трех паспортных нагрузочных диаграмм независимо от углов приложения нагрузки.

3. Суперпозиция нагрузочной диаграммы с использованием численной модели виброизолятора в виде системы пружин

Ранее выполнено исследование погрешности модели тросового виброизолятора в виде системы взаимно перпендикулярных пружин [16]. Научно-методический интерес представляет реализация принципа суперпозиции с помощью этой модели для оценки взаимодействия (нарастания или взаимного поглощения) погрешностей и самого принципа суперпозиции и модели виброизолятора в виде системы пружин.

Рассмотрим модели виброизолятора в виде нелинейных пружин (рис. 5), углы между осями которых составляют 45° : одна модель представлена пружиной 2 и имитирует работу виброизолятора при сжатии под углом 45° , другая включает систему взаимно перпендикулярных

пружин 1 и 3. Построение расчетной нагрузочной диаграммы путем суперпозиции паспортных диаграмм пружин 1 и 3, сравнение этой расчетной диаграммы с паспортной для пружины 2 позволит оценить погрешность суперпозиции. Жесткости пружин 1, 2 и 3 заданы нагрузочными диаграммами (1)–(3) соответственно. Тогда, рассматриваемые независимо друг от друга, пружина 1 деформируется по схеме «сжатие», пружина 2 — «сжатие 45° », пружина 3 — «сдвиг» (см. рис. 1, а).

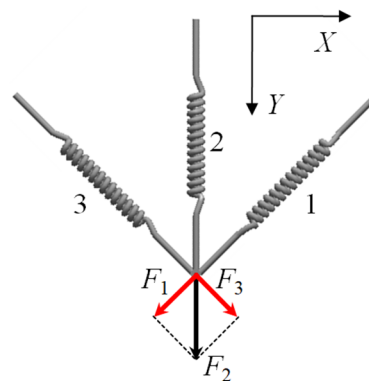


Рис. 5. Модели виброизолятора в виде системы пружин
Источники: выполнено С.В. Дорониным,
Е.М. Рейзмут, Ю.Ф. Филипповой.

Figure 5. Spring-System Models of the Vibration Isolator
Source: by S.V. Doronin, E.M. Reizmunt, Yu.F. Filippova.

Анализ выполняется в следующей последовательности. Вначале деактивируются (исключаются из расчетной схемы) пружины 1 и 3, а пружина 2 растягивается силой F_2 переменной величины вдоль оси пружины. Получаемые результаты, очевидно, полностью идентичны нагрузочной диаграмме 2 (кривая 2 на рис. 1, в). Далее рассматривается совместная работа пружин 1 и 3 (деактивируется пружина 2). Силы F_1 и F_3 определяются проекциями силы F_2 на осевые линии пружин 1 и 3. Последовательно определяются, а затем суммируются смещения системы двух пружин при независимом действии сил F_1 и F_3 (реализация принципа суперпозиции). Сравнение смещений при нагружении пружины 2 силой F_2 и системы пружин 1 и 3 силами F_1 и F_3 позволяет оценить погрешность суперпозиции нагрузоч-

ной диаграммы с использованием численной модели виброизолятора в виде системы пружин.

Полученные оценки погрешности численной суперпозиции нагрузочных диаграмм показывают (рис. 6), что погрешность длины вектора перемещений Δs находится в диапазоне $-15 \dots 13 \%$, а угловая оценка погрешности составляет от 30 до 47 %.

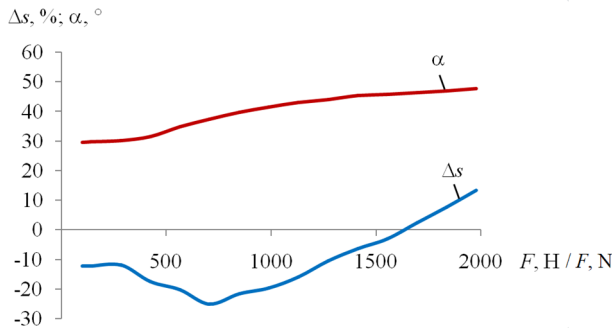


Рис. 6. Оценки погрешности численной суперпозиции нагрузочных диаграмм

Источники: выполнено С.В. Дорониным, Е.М. Рейзмут, Ю.Ф. Филипповой.

Figure 6. Error Estimates for Numerical Superposition of Load-Deflection Curves

Source: made by S.V. Doronin, E.M. Reizmunt, Yu.F. Filippova.

4. Анализ и сопоставление результатов

При сравнении результатов оценки погрешностей аналитической (см. рис. 4) и численной (рис. 6) суперпозиции нагрузочных диаграмм виброизолятора ВМТ-350 можно отметить следующие закономерности. Угловая оценка погрешности α преимущественно возрастает с увеличением нагрузки F , однако численная суперпозиция приводит к монотонному росту α , а аналитическая суперпозиция демонстрирует слабо выраженный максимум в области высоких значений нагрузки. Количественное значение угловой оценки погрешности всегда больше для численной суперпозиции.

Оценка погрешности длины вектора перемещений демонстрирует наличие экстремума в узком диапазоне нагрузок (~600–700 Н), но аналитическая суперпозиция приводит к максимуму, а численная — к минимуму. По абсолютной величине наибольшие значения погрешности длины вектора перемещений при анали-

тической и численной суперпозиции примерно равны и составляют порядка 25 %.

Результаты суперпозиции могут быть как больше, так и меньше данных паспортной нагрузочной диаграммы. Тогда в соответствии с (11) знак Δ_S может быть как положительным ($s^{F_1+F_3} > s^{F_2}$), так и отрицательным ($s^{F_1+F_3} < s^{F_2}$). Из рис. 4 и 6 следует, что в большей части диапазона нагрузок аналитическая суперпозиция приводит к завышенным, а численная — к заниженным оценкам перемещений.

Ранее получены оценки погрешности модели тросового виброизолятора в виде системы взаимно перпендикулярных пружин [16]: расчетные перемещения по разным направлениям приложения нагрузки оказывались заниженными по сравнению с данными паспортных диаграмм до 19–33 %. Сравнивая эти оценки с результатами аналитической и численной суперпозиции, можно предположить, что погрешность собственно принципа суперпозиции и погрешность пружинной модели виброизолятора, имея противоположные знаки, частично компенсируют друг друга.

В целом и при аналитической, и при численной суперпозиции оценки погрешности неприемлемо велики и составляют десятки процентов: для угловой оценки во всем диапазоне рассматриваемых нагрузок, для длины вектора перемещений — в большей части этого диапазона.

Заключение

Как известно, между подтверждением и опровержением гипотезы не существует симметрии: подтверждающие гипотезу частные случаи только повышают вероятность ее справедливости, а единственный не подтверждающий случай достаточен для ее опровержения. Таким образом, для частного случая виброизолятора ВМТ-350 с условно умеренной степенью нелинейности получение расчетных нагрузочных диаграмм путем суперпозиции нес-

кольных паспортных приводит к неприемлемо большой погрешности результата и в общем случае не может быть рекомендовано к практическому применению. Однако нельзя исключить существования подкласса виброизоляторов, рассчитанных на большую нагрузку, с незначительным уровнем нелинейности нагрузочных диаграмм, для которых принцип суперпозиции окажется практически применим и оправдан.

Список литературы

1. Рейзмунт Е.М., Доронин С.В. Возможности построения расчетных нагрузочных диаграмм спирально-тросового амортизатора при изменении направления действия сил инерции // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 4. С. 337–347. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-337-347> EDN: EPVUJA
2. Ишлинский А.Ю. Новый политехнический словарь. Москва: Большая Российская энциклопедия, 2000. 671 с. ISBN 5-85270-322-2
3. Алюшин Ю.А., Вержанский П.М., Калинин М.Н. Управление движением навигационного робота мощностью приводов ведущих колес // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 1. С. 154–162. EDN: RAEXFF
4. Мошенжал А.В., Тарасов В.Н. Влияние нескольких поверхностных нагрузок на обеспечение условия сдвигустойчивости малосвязных грунтов конструктивных слоев и оснований дорожных одежд // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2015. № 3 (39). С. 54–59. EDN: UHAENP
5. Меркухин Е.Н. Синтез тепловой модели на основе принципа суперпозиции температурных полей для платы микроблока электронной аппаратуры // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 10–4. С. 534–538. EDN: WWRTUJ
6. Игнатик А.А. Расчетно-экспериментальная оценка напряженного состояния трубопровода под воздействием изгибающей нагрузки и внутреннего давления // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2021. № 2 (146). С. 114–126. <http://doi.org/10.31660/0445-0108-2021-2-114-126> EDN: QWSVMI
7. Шеретов Ю.В. Принцип суперпозиции решений квазигидродинамической системы // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Прикладная математика. 2022. № 2. С. 60–73. <https://doi.org/10.26456/vtprmk638> EDN: JRKMNI
8. Ларионов Е.А., Римшин В.И., Жданова Т.В. Принцип наложения деформаций в теории ползучести // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 6. С. 483–496. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-6-483-496> EDN: QYMJOC
9. Корытов М.С., Щербаков В.С. Оценка точности суперпозиции плоских моделей мостового крана при моделировании гашения пространственных колебаний груза // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2018. Т. 15. № 1 (59). С. 29–36. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-1-29-36> EDN: YTMCKP
10. Полисмакова М.Н. Сандуляк А.В. Возможности оптимизации технических решений на основе фундаментальных базовых принципов // Универсальный дизайн — Равные возможности — Комфортная среда, 2019: сборник докладов III Национальной науч.-практ. конф. с международным участием. Москва, 26–27 ноября 2019 года. Москва: МИРЭА — Российский технологический университет, 2019. С. 64–68. EDN: MZDDXY
11. Руденок А.Е. Изохронность обратимых систем с однородными нелинейностями 4-й степени // Вестник БГУ. Серия 1, Физика. Математика. Информатика. 2010. № 2. С. 147–150. EDN: SJFVCT
12. Андрианов И.В. Асимптотика нелинейных динамических систем при высокой степени нелинейности // Доклады Академии наук. 2002. Т. 386. № 2. С. 165–168. EDN: PNHQJU
13. Детченя Л.В., Маковецкая Т.В., Садовский А.П., Трифонова И.В., Чергинцев Д.Н. Проблема центра и фокуса для кубических систем с однородными нелинейностями второй и третьей степени // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 2. Математика. Физика. Информатика, вычислительная техника и управление. 2019. Т. 9. № 1. С. 26–38. EDN: YVUINV
14. Кудряшов Н.А., Сафонова Д.В. Точные решения нелинейного дифференциального уравнения для описания оптических импульсов с нелинейностью третьей и пятой степени // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». 2020. Т. 9. № 1. С. 25–31. <https://doi.org/10.1134/S2304487X20010046> EDN: PZCUFV
15. Базилевский М.П., Караулова А.В. Способ измерения степени нелинейности многофакторных полиномиальных и полиномиальных регрессионных моделей // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. 2022. № 4 (16). С. 1–9. [https://doi.org/10.26731/2658-3704.2022.4\(16\).1-9](https://doi.org/10.26731/2658-3704.2022.4(16).1-9) EDN: QOAUOW
16. Доронин С.В., Рейзмунт Е.М. Анализ погрешности модели тросового амортизатора в виде системы взаимно перпендикулярных пружин при статическом

нагружении // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 5. С. 547–551. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-5-547-548> EDN: BGPFSK

References

1. Reizmunt EM, Doronin SV. Possibilities of constructing design load diagrams of a helical cable shock damper when the direction of inertia forces changes. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(4):337–347 (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-337-347> EDN: EPVUJA

2. Ishlinskij AYu. *New polytechnic dictionary*. Moscow: Great Russian Encyclopedia Publ.; 2000. (In Russ.) ISBN 5-85270-322-2

3. Alyushin YuA, Verzhansky PM, Kalinkin MN. Management of movement of the navigating robot of capacity of drives of driving wheels. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2013;(1):154–162. (In Russ.) EDN: RAEXFF

4. Moshenzhal AV, Tarasov VN. Influence of several surface loads on shear strength of granular soil structural layers of road pavements and foundations. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2015;3(39):54–59. (In Russ.) EDN: UHAENP

5. Merkuhin EN. The Synthesis of the thermal model based on the principle of superposition of temperature fields for microblock board electronics. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2016;10-4:534–538. (In Russ.) EDN: WWRTUJ

6. Ignatik AA. A computational and experimental assessment of the pipeline stress state under bending load and internal pressure. *Oil and Gas Studies*. 2021;2(146):114–126. (In Russ.) <http://doi.org/10.31660/0445-0108-2021-2-114-126> EDN: QWSVMI

7. Sheretov YuV. Superposition principle for solutions of quasi-hydrodynamic system. *Bulletin of Tver State University. Series: Applied Mathematics*. 2022;(2):60–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.26456/vtpmk638> EDN: JRKMNI

8. Larionov EA, Rimshin VI, Zhdanova TV. Principle of the overlay deformations in the theory of creep. *Structural mechanics of engineering constructions and buildings*. 2019;15(6):483–496. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-6-483-496> EDN: QYMJOC

9. Korytov MS, Shcherbakov VS. Accuracy evaluation of the bridge crane flat models' superposition at modeling the saturation of cargo spatial vibrations. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018;15(1):29–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-1-29-36> EDN: YTMCKP

10. Polismakova MN, Sandulyak AV. Possibilities of optimizing technical solutions based on fundamental basic principles. *Universal design — Equal opportunities — Comfortable environment, 2019*; Moscow, November 26–27, 2019. Moscow: MIREA — Russian University of Technology, 2019. p. 64–68. (In Russ.) EDN: MZDDXY

11. Rudenok AE. Isochronism of reversible systems with homogeneous nonlinearities of the 4th degree. *Bulletin of BSU. Series 1, Physics. Mathematics. Computer Science*. 2010;(2):147–150. (In Russ.) EDN: SJFVCT

12. Andrianov IV. Asymptotics of nonlinear dynamic systems with a high degree of nonlinearity. *Doklady Akademii Nauk [Reports of the Academy of Sciences]*. 2002;386(2):165–168. (In Russ.) EDN: PNHQJU

13. Detchenya LV, Makovetskaya TV, Sadovski AP, Trifonova IV, Cherginets DN. The problem of center and focus for cubic systems with homogeneous nonlinearities of the second and third degrees. *Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 2. Mathematics. Physics. Informatics, Computer Technology and Control*. 2019;9(1):26–38. (In Russ.) EDN: YVUINV

14. Kudryashov NA, Safonova DV. Exact solutions of a nonlinear differential equation with third and fifth degree nonlinearities for description of optical pulses. *Bulletin of the National Research Nuclear University MEPHI*. 2020;9(1):25–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S2304487X20010046> EDN: PZCUFV

15. Bazilevskiy MP, Karaulova AV. A method for measuring the nonlinearity degree of multivariate polynomial and posinomial regression models. *Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems*. 2022;4(16):1–9. (In Russ.) [https://doi.org/10.26731/2658-3704.2022.4\(16\).1-9](https://doi.org/10.26731/2658-3704.2022.4(16).1-9) EDN: WFVGGR

16. Doronin SV, Reizmunt EM. Analysis of cable shock damper model error in the form of a system of mutually perpendicular springs under static loading. *Bulletin of Tula State University. Engineering sciences*. 2024;(5):547–551. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-5-547-548> EDN: BGPFSK

Сведения об авторах

Доронин Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Лаборатории вычислительной механики и риск-анализа, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Российская Федерация, 660000, г. Красноярск, а/я 25515; eLIBRARY SPIN-код: 9816-9080, ORCID: 0000-0002-5256-3871; e-mail: mr.svdoronin@yandex.ru

Рейзмунт Елена Михайловна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Лаборатории вычислительной механики и риск-анализа, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Российская Федерация, 660000, г. Красноярск, а/я 25515; eLIBRARY SPIN-код: 4397-1569, ORCID: 0000-0003-1631-893X; e-mail: e.sigova@gmail.com

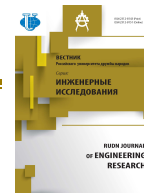
Филиппова Юлия Федоровна, кандидат технических наук, научный сотрудник Лаборатории вычислительной механики и риск-анализа, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Российская Федерация, 660000, г. Красноярск, а/я 25515; ORCID: 0000-0001-7452-2096; eLIBRARY SPIN-код: 7778-5327, ORCID: 0000-0001-7452-2096; e-mail: filippovajf@ict.nsc.ru

About the authors

Sergey V. Doronin, PhD in Technical Sciences, leading researcher of Laboratory of Computational Mechanics and Risk Analysis, Federal Research Center for Information and Computational Technologies, a/z 25515 Krasnoyarsk, 660000, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9816-9080, ORCID: 0000-0002-5256-3871; e-mail: mr.svdoronin@yandex.ru

Elena M. Reizmunt, PhD in Technical Sciences, Senior Researcher of Laboratory of Computational Mechanics and Risk Analysis, Federal Research Center for Information and Computational Technologies, a/z 25515 Krasnoyarsk, 660000, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 4397-1569, ORCID: 0000-0003-1631-893X; e-mail: e.sigova@gmail.com

Yulia F. Filippova, PhD in Technical Sciences, Researcher of Laboratory of Computational Mechanics and Risk Analysis, Federal Research Center for Information and Computational Technologies, a/z 25515 Krasnoyarsk, 660000, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 7778-5327, ORCID: 0000-0001-7452-2096; e-mail: filippovajf@ict.nsc.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-2-249-260

EDN: LCLDFV

Research article / Научная статья

Finite Element Simulation of the 3D Printing Process for the Fabrication of Fatigue Test Specimens with Regard to Residual Stresses

Kazem Reza Kashyzadeh[✉], Siamak Ghorbani^{ORCID}, Abdesselem Said^{ORCID}

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ reza-kashi-zade-ka@rudn.ru

Article history

Received: December 22, 2025

Revised: February 7, 2026

Accepted: February 14, 2026

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability

All data obtained during this study are included in the published article.

Authors' contribution

Reza Kashyzadeh K. — methodology, formal analysis, investigation, writing and editing text, supervision, coordination of the research; *Ghorbani S.* — methodology, investigation, writing and original draft preparation; *Said A.* — software. All authors read and approved the final version of the article.

Funding

This study was supported by the Russian Science Foundation (RSF, Grant No. 25-29-00536).

For citation

Reza Kashyzadeh K, Ghorbani S, Said A. Finite element simulation of 3D printing process for fatigue specimen fabrication from the perspective of residual stress. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(2):249–260. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-249-260> EDN: LCLDFV

© Reza Kashyzadeh K., Ghorbani S., Said A., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Конечно-элементное моделирование процесса 3D-печати для изготовления образцов для испытаний на усталость с точки зрения остаточных напряжений

К. Реза Каши Заде[✉], С. Горбани^{id}, А. Саид^{id}

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация
✉ reza-kashi-zade-ka@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 22 декабря 2025 г.

Доработана: 7 февраля 2026 г.

Принята к публикации: 14 февраля 2026 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта

При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Аннотация. Усталостное разрушение при циклическом нагружении является важнейшей проблемой для инженеров-конструкторов, поскольку остаточные напряжения при растяжении могут значительно сократить срок службы компонента. Процессы аддитивного производства, такие как 3D-печать, по своей сути создают такие напряжения из-за высоких термических градиентов, что обуславливает необходимость тщательной оценки остаточных напряжений в печатных деталях. Для решения данной задачи в настоящем исследовании разработана конечно-элементная модель, имитирующая процесс 3D-печати стандартного образца для усталостных испытаний. Моделирование выполнено для сплава Инконель 625 с ориентацией построения вдоль направления толщины образца (PDT). По результатам расчета получены детальное распределение полного тензора остаточных напряжений и эквивалентного напряжения по Мизесу на завершающей стадии изготовления. Анализ показывает, что, несмотря на возникновение существенных напряжений при растяжении в продольном направлении рабочей части, выбранная ориентация PDT успешно локализует наибольшие концентрации напряжений в зонах контакта с опорными структурами, вне критической для испытаний области.

Ключевые слова: аддитивное производство, селективное лазерное плавление, Инконель 625, остаточные напряжения, МКЭ

Вклад авторов

Реза Каши Заде К. — методология, формальный анализ, проведение исследования, написание и редактирование текста, научное руководство, координация исследования; *Горбани С.* — методология, проведение исследования, написание и подготовка первоначального варианта текста; *Саид А.* — программное обеспечение. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (РНФ, грант № 25-29-00536).

Для цитирования

Reza Kashyzadeh K., Ghorbani S., Said A. Finite element simulation of the 3D printing process for the fabrication of fatigue test specimens with regard to residual stresses // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 2. С. 249–260. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-249-260> EDN: LCLDFV

Introduction

In additive manufacturing, residual stresses caused by temperature gradients during fabrication are a principal concern, as they can induce geo-

metric distortion, promote delamination, and, most critically, serve as a precursor to fatigue crack initiation, thereby drastically reducing the service life of a component [1–5]. Consequently, the prediction and mitigation of residual stress are vital

for the reliable application of AM parts under cyclic loadings.

In recent years, along with time-consuming and expensive tests, finite element analysis has emerged as a powerful and cost-effective tool for simulating complex thermomechanical phenomena [6–9]. In this regard, numerous studies have used FEA to investigate the influence of 3D printing process parameters, such as laser power, scan speed, and scan strategy, on residual stress. For instance, Jung et al. [10] numerically analyzed the impact of laser rotation patterns on residual stress in a simple square geometry, whereas Zhou et al. [11] employed a 3D model to study scanning strategies in Ti-6Al-4V. Furthermore, it was shown that by controlling two key parameters, the scanning length and input energy, the maximum residual stress in the 3D printed part can be reduced [12].

Recent studies have increasingly applied machine learning and data analysis to optimize 3D printing parameters [13]. For instance, Goh et al. examined the uses and obstacles of machine learning in additive manufacturing [14]. Separately, Nguyen et al. used a data-driven machine learning method to refine printing parameters, asserting that their approach is universally applicable across different part designs and material types, including plastics and composites [15]. Additionally, Tamir et al. developed a novel optimization strategy by first establishing a predictive model that links process settings to part quality, and then integrating this model with a fuzzy logic system in a closed-loop controller to dynamically determine the best parameters [16].

Despite these contributions, a significant portion of the literature has focused on simple cubic geometries. Few studies have simulated the build process of standard mechanical test specimens, such as those designed for fatigue evaluation. This study aims to address this gap by presenting a comprehensive 3D thermo-mechanical finite element model of the SLM process for an ASTM standard Inconel 625 fatigue specimen. Thus, the residual stress field was investigated in the overall case, as well as the stress tensor components separately.

1. Finite Element Modeling and Simulation Framework

This section details the comprehensive numerical methodology developed to simulate the selective laser melting process for fabricating an ASTM-standard Inconel 625 fatigue specimen. A sequentially coupled thermomechanical Finite Element Analysis (FEA) was conducted to predict the transient temperature history and the resulting residual stress field. The simulation framework, implemented in Ansys Additive Suite 2019 R3, incorporates advanced modeling techniques to accurately capture the complex multiphysics phenomena inherent to metal additive manufacturing.

1.1. Geometry, Mesh, and Build Orientation

The specimen geometry was designed according to ASTM E466 standard for constant-amplitude axial fatigue testing, with a total length of 165 mm, gauge section width of 19 mm, and uniform thickness of 3.2 mm (Figure 1).

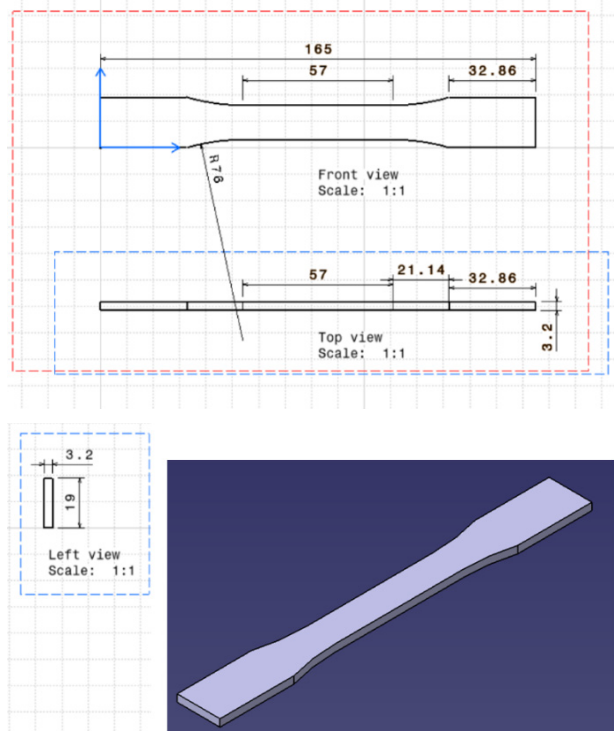


Figure 1. Schematic of the geometry and dimensions of the specimen according to the ASTM standard for high-cycle axial fatigue testing (dimensions are in mm)

Source: by K. Reza Kashyzadeh, S. Ghorbani, A. Said.

Based on the authors' previous research [17], it was found that if the sample is printed in the direction of the thickness, the lowest residual stress intensity is created in the part. Therefore, in this study, it was assumed that the printing direction was in the direction of the sample thickness, as shown in Figure 2.

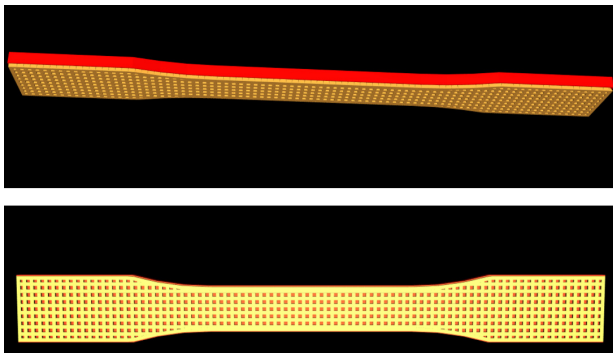


Figure 2. A representation of the 3D printed direction of the fatigue specimen in the thickness direction

Source: by K. Reza Kashyzadeh et al. [17].

A conforming mesh of second-order tetrahedral elements (SOLID187 in Ansys) was generated using the patch-conforming algorithm. A refined mesh density was applied to the gauge section and support interfaces to accurately capture steep thermal gradients and mechanical stress concentrations. A uniform block support structure with a standard grid hatch pattern was generated to ensure consistent thermal conduction to the build plate. Three mesh densities were evaluated in a convergence study.

Coarse mesh: average element size of 1.5 mm (total elements: 125340).

Medium mesh: average element size of 1.0 mm (total elements: 285620).

Fine mesh: average element size of 0.7 mm (total elements: 512890).

The mesh sensitivity analysis revealed that the medium mesh produced stress results within 2.8% of the fine mesh solution while reducing the computational time by 58%. Therefore, a medium mesh configuration was adopted for all simulations, with additional local refinement (element size of 0.3) applied to the gauge section and support interface regions.

1.2. Material and Temperature-Dependent Properties

The nickel-based superalloy Inconel 625 was selected owing to its relevance in high-performance AM applications. A temperature-dependent elastoplastic material model with isotropic hardening was employed. The key material properties critical for the thermomechanical simulation are summarized in Table 1. These include powder and solid absorptivity (governing laser energy input), elastic modulus, Poisson's ratio, yield strength, and coefficients for thermal expansion and anisotropic strain to account for the direction-dependent shrinkage during solidification and cooling.

Table 1. Thermo-mechanical properties of Inconel 625 for 3D printing simulation based on the ANSYS Additive dataset

Properties	Value
Powder Absorptivity	0.6
Solid Absorptivity	0.4
Elastic Modulus, GPa	208
Poisson's Ratio	0.33
Yield Strength, MPa	480
Isotropic Hardening Factor	0.004
Thermal Expansion Coefficient (K^{-1})	0.000013
Anisotropic Strain Coefficients ($ $)	1.5
Anisotropic Strain Coefficients (\perp)	0.5
Anisotropic Strain Coefficients (Z)	1

Source: by K. Reza Kashyzadeh, S. Ghorbani, A. Said.

1.3. Process Parameters and Boundary Conditions

The laser parameters as constant power of 250 W, scan speed of 800 mm/s, and hatch spacing 100 μm were defined. A stripe scan strategy with a 5 mm stripe width and 67° rotations between layers was used to mitigate pattern-induced stresses. The initial powder bed and baseplate temperatures were set to 80°C. The build plate was modeled as a rigid body, with its bottom surface assigned a fixed displacement constraint in all directions ($U_x = U_y = U_z = 0$) to represent the mechanical clamping. Convective and radiative heat losses to the environment were applied to all the free surfaces.

1.4. Simulation Algorithm: A Step-by-Step Procedure

The analysis followed a sequential workflow that decoupled the complex physics into manageable thermal and mechanical stages. The procedure is outlined algorithmically below to ensure clarity and reproducibility of the process.

Algorithm 1: Sequential Thermo-Mechanical FEA for Residual Stress Prediction in 3D printed parts

Input: Part Geometry (Figure 1), Material Properties (Table 1), Process Parameters (Laser Power, Speed, Scan Strategy).

Output: Residual Stress Tensor $\sigma_{ij}(x, y, z)$ and von Mises Stress σ_{vm} .

Step 1: Preprocessing and Model Setup

1. Import & Orient: Import the ASTM specimen CAD model. Define the build orientations (Thickness).

2. Generate Supports: Block support structures with a grid hatch pattern.

3. Mesh Generation: Discretize the part and support using a conforming tetrahedral mesh. Apply local mesh refinement in the gauge section and at the support interfaces.

4. Assign Material: Assign the temperature-dependent elastoplastic properties of Inconel 625 (Table 1) to the part volume.

Step 2: Thermal Analysis (Transient)

5. Apply Thermal BCs: Set the initial temperature for the powder/bed (80°C). Apply convective heat loss to all free surfaces.

6. Define Heat Source: Model the moving laser as a volumetric Gaussian heat source. Input laser power (250 W), scan speed (800 mm/s), etc., and beam diameter.

7. Simulate Layer-by-Layer Deposition: Activate elements layer-by-layer to simulate material addition. Solve the transient nonlinear heat conduction equation:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_{\text{laser}},$$

where ρ is density, C_p is specific heat, k is thermal conductivity, and Q_{laser} is the laser heat input.

8. Export Thermal History: Upon completion, export the full time-history of the nodal temperature field $T(t)$ for all layers.

Step 3: Mechanical Analysis (Quasi-Static)

9. Apply Mechanical BCs: Fix the bottom surface of the build plate in all the degrees of freedom ($U_x = U_y = U_z = 0$).

10. Map Thermal Load: Import the calculated temperature history $T(t)$ as a thermal load body for the mechanical simulation.

11. Simulate Thermally Induced Deformation: Perform a static structural analysis for each time increment (layer activation). The mechanical solver calculates the stress from the thermal strain $\epsilon_{\text{thermal}} = \alpha \Delta T$ and the anisotropic strain model by solving the equilibrium equation:

$$\nabla \cdot \sigma = 0,$$

where σ is the stress tensor.

12. Activate Layers with Birth/Death: Mechanically “activate” elements in sequence corresponding to the thermal analysis, allowing stress to accumulate as the part is built.

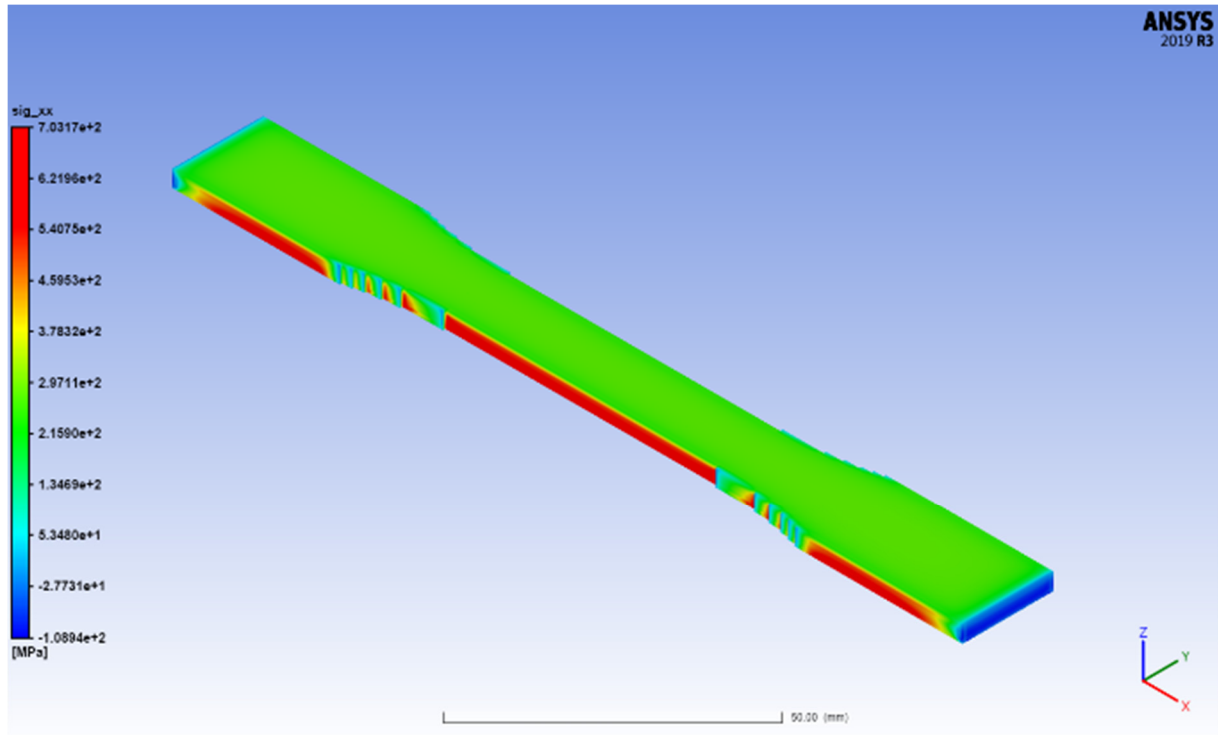
Step 4: Post-Processing and Extraction

13. Extract Residual Stress: After the final layer is cooled to room temperature, extract the stress tensor components (σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz}) and the von Mises equivalent stress (σ_{vm}).

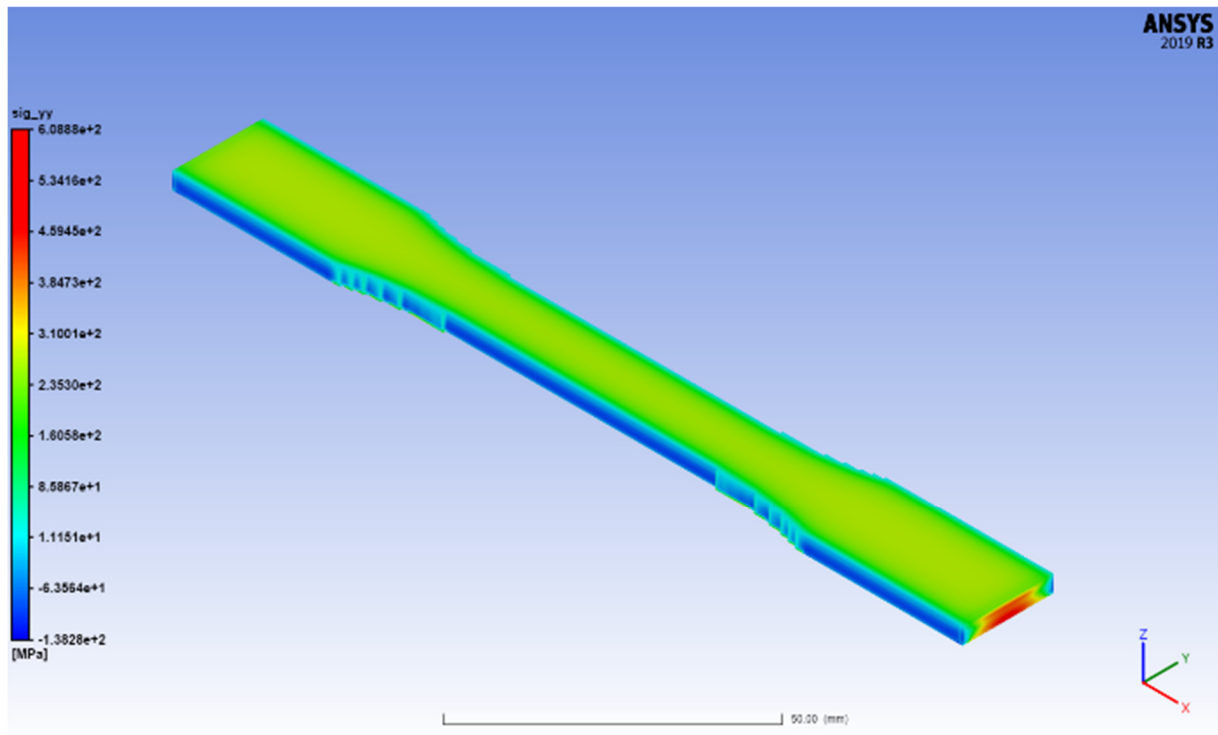
2. Results and Discussion

Following the procedure in Algorithm 1, the thermomechanical simulation of the Inconel 625 fatigue specimen printed in the thickness direction (PDT) was performed. This section presents a detailed statistical analysis of the resulting residual stress fields, complemented by rigorous quantitative assessments and a comparative evaluation.

The complete residual stress tensor predicted by the simulation exhibited complex spatial variations across the specimen volume. Figure 3 presents contour plots of all six independent stress components, and Table 2 provides comprehensive statistical summaries extracted from the nodal data across the entire part and specific regions of interest.



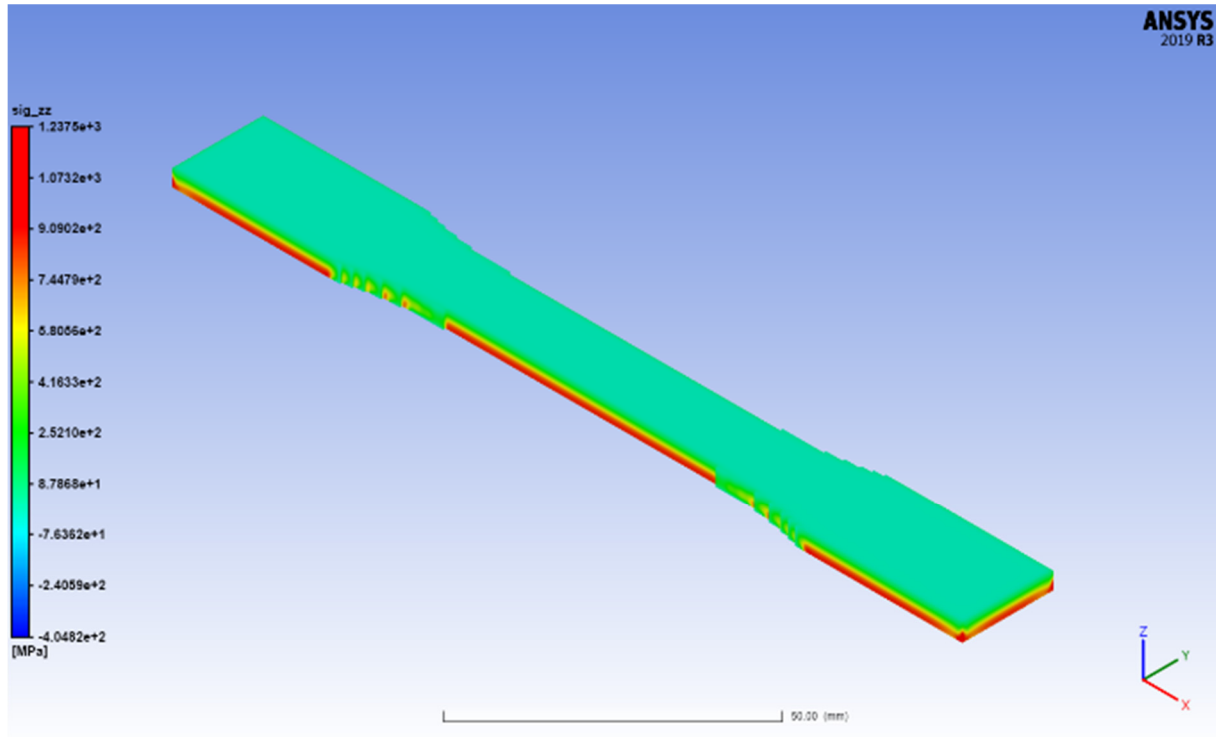
a



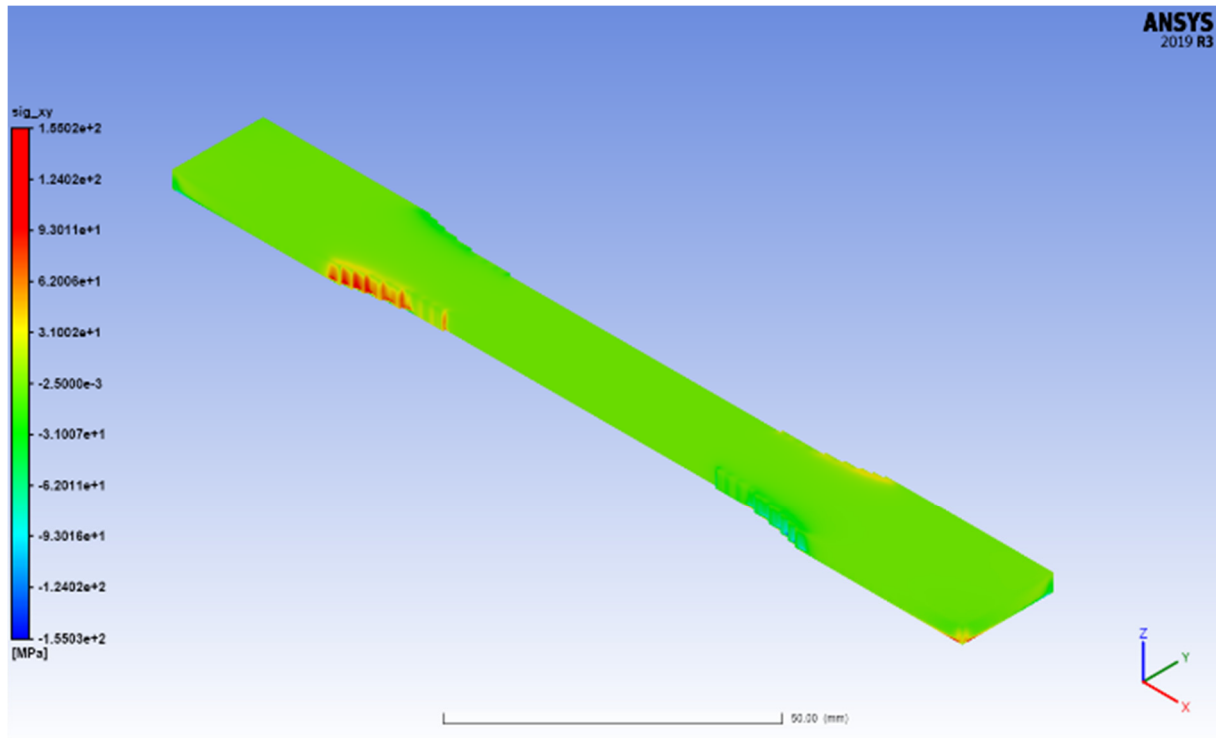
b

Figure 3. Contour of the stress tensor components after the completion of the 3D printing process:
a — normal stress in *X*-direction (σ_{xx}); *b* — *Y*-direction (σ_{yy})

Source: by K. Reza Kashyzadeh, S. Ghorbani, A. Said.



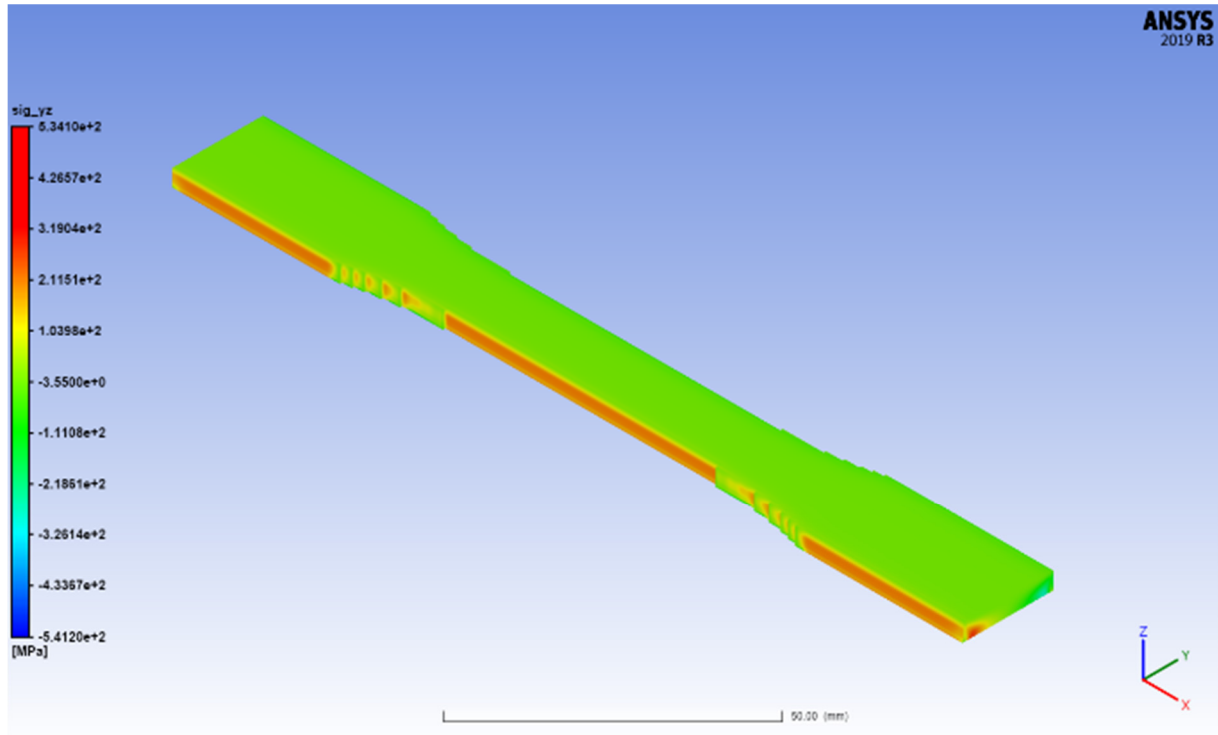
c



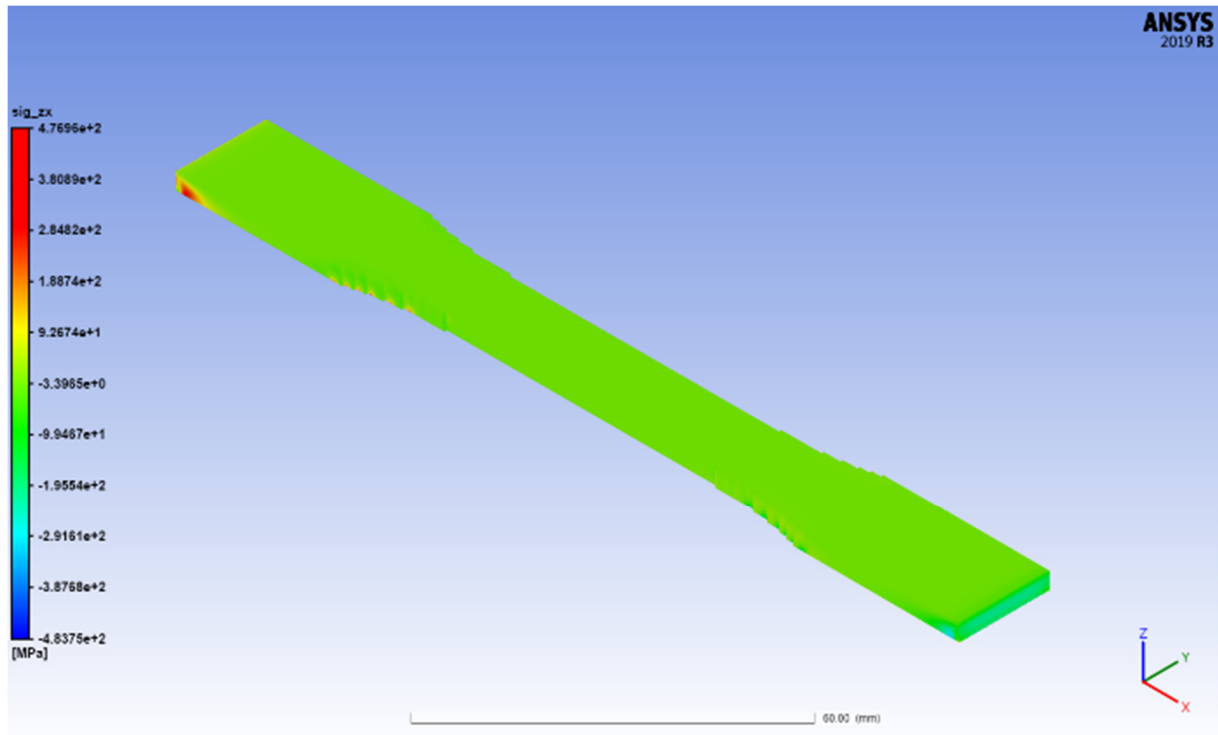
d

Figure 3 (Continuation). Contour of the stress tensor components after the completion of the 3D printing process:
c — *Z*-direction (σ_{zz}); *d* — shear stress in *XY*-plane (τ_{xy})

Source: by K. Reza Kashyzadeh, S. Ghorbani, A. Said.



e



f

Figure 3 (Ending). Contour of the stress tensor components after the completion of the 3D printing process:

e—YZ-plane (τ_{yz}); *f*—XZ-plane (τ_{xz})

Source: by K. Reza Kashyzadeh, S. Ghorbani, A. Said.

Table 2. Statistical summary of residual stress components in 3D-printed Inconel 625 specimen (values in MPa)

Stress component	Global statistics	Gauge section	Support interface	Volume fraction > Yield strength
σ_{xx} (Longitudinal)	Max: 703.2 Min: -108.9 Mean: 85.4	Max: 426.5 Min: 184.1 Mean: 196.3	Max: 703.2 Min: -108.9 Mean: -12.5	18.7% of volume
σ_{yy} (Transverse)	Max: 608.9 Min: -138.3 Mean: 62.8	Max: 365.2 Min: 133.2 Mean: 142.8	Max: 608.9 Min: -138.3 Mean: -28.9	15.2% of volume
σ_{zz} (Through-thickness)	Max: 123.8 Min: -404.8 Mean: -48.2	Max: -10.5 Min: -156.3 Mean: -15.3	Max: 123.8 Min: -404.8 Mean: -165.8	6.8% of volume
τ_{xy} (In-plane shear)	Max: 155 Min: -155 Mean: 0.4	Max: 78.6 Min: 0.8 Mean: 3.2	Max: 155 Min: -155 Mean: -1.8	2.1% of volume
τ_{yz} (Out-of-plane shear)	Max: 477 Min: -483.8 Mean: 2.1	Max: 145.2 Min: 4.3 Mean: 8.6	Max: 477 Min: -483.8 Mean: 15.4	9.3% of volume
τ_{xz} (Out-of-plane shear)	Max: 534.1 Min: -541.2 Mean: 1.8	Max: 128.9 Min: 1.1 Mean: 5.3	Max: 534.1 Min: -541.2 Mean: 12.9	11.6% of volume

Source: by K. Reza Kashyadeh, S. Ghorbani, A. Said.

The distribution of residual stresses revealed that the principal stresses were non-uniform. Of particular note is the significant tensile stress ($\sigma_{xx} = 703.17$ MPa in global and 426.5 MPa in gauge length) developed along the specimen’s longitudinal axis within the gauge length (Figure 3, *a*), which is critical for tensile strength and also subsequent axial fatigue loading. The shear stress components (Figure 3, *d – 3, f*) show localized concentrations at the junctions between the specimen and the support structure, indicating regions of potential stress singularity or high gradient. The von Mises equivalent stress, which provides a scalar measure of the overall residual stress intensity, is shown in Figure 4. The contour plot confirmed that the highest stress levels (approximately 290 MPa) were concentrated at the interface between the bottom of the gauge section and the support structure, as well as along the free edges of the first deposited layers.

However, this value is obtained by ignoring the corners of the model, which are fixed in the jaw section during various loadings, such as tensile and

fatigue tests, and are not important from a failure perspective. Importantly, within the central region of the gauge length, which is the volume most relevant for fatigue crack initiation, the von Mises stress is relatively lower and more uniformly distributed. This pattern validates the choice of the PDT orientation, as it localizes the highest residual stresses away from the critical testing zone.

The simulated stress state has direct implications for the fatigue performance. The tensile stress, σ_{xx} , in the gauge section will superimpose onto any applied cyclic tensile load, effectively increasing the mean stress of the fatigue cycle and potentially accelerating crack initiation according to models such as Goodman or Gerber. Furthermore, the worst-case scenario is when a 3D printed part is subjected to multiaxial fatigue loading. In other words, if cyclic loading is applied disproportionately in the *X* and *Y* directions, it can significantly reduce the life of a part. Future work will include the accurate extraction of this residual stress field for use in fatigue life prediction analysis in both uniaxial and multiaxial modes (i.e., proportional and non-proportional).

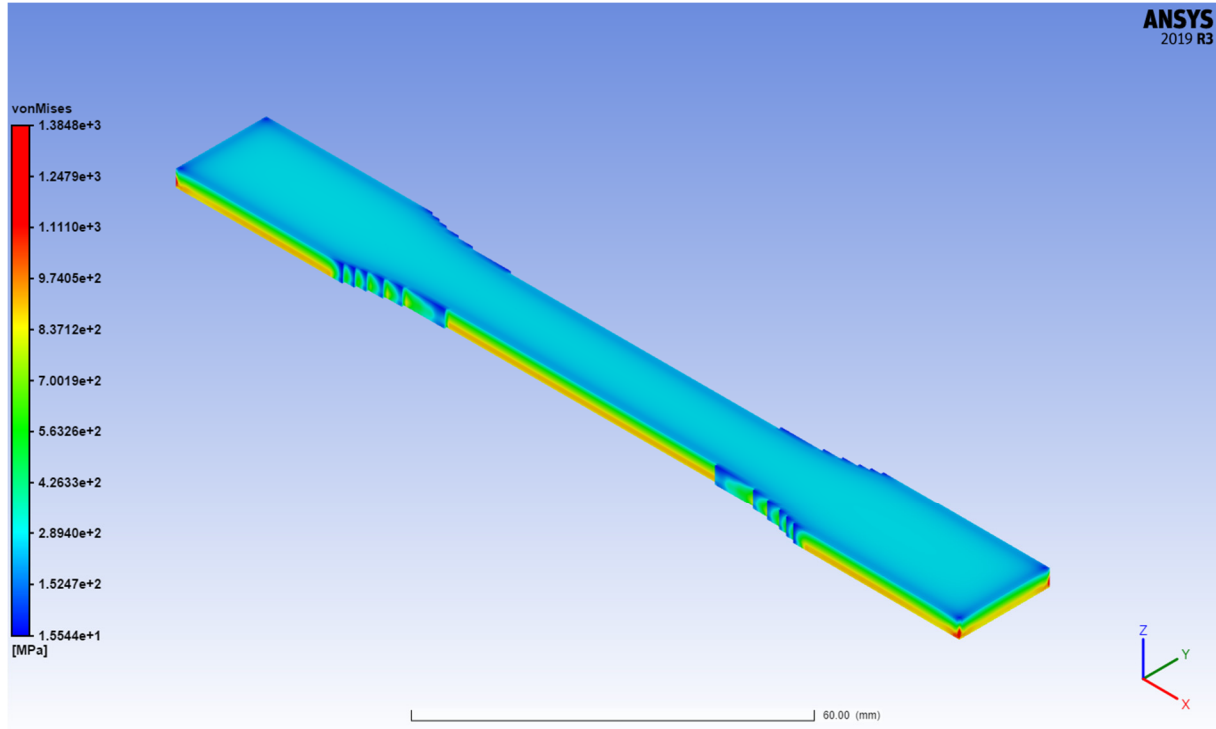


Figure 4. Contour of the von Mises equivalent stress in the 3D printed part representing the residual stress during the manufacturing process

Source: by K. Reza Kashyzadeh, S. Ghorbani, A. Said.

Conclusion and Future Direction

In this study, a sequentially coupled thermo-mechanical finite element model was developed and applied to simulate the 3D printing process for an ASTM-standard Inconel 625 fatigue specimen built in the thickness direction (PDT). The comprehensive methodology, detailed in a step-by-step algorithm, provided a clear framework for predicting the residual stress field induced by additive manufacturing.

The key findings are as follows.

- The simulation successfully predicted the complex multiaxial state of the residual stress within the specimen, with the full stress tensor and von Mises equivalent stress visualized.

- The results confirmed that for the PDT orientation, the most critical residual stresses were concentrated at the support interface and the edges of the initial layers, with a more favorable, lower-stress state achieved within the central gauge length region.

- The presence of significant tensile longitudinal stress (σ_{xx}) in the gauge section was identified as a key factor that must be accounted for in subsequent fatigue life assessments.

- The results show that after the longitudinal direction, the most critical path for axial loading is in the width direction of the specimen, where the residual stress component, σ_{yy} , has the highest value.

- The simulation results indicate that if cyclic loading is applied in both the X and Y directions simultaneously, it can cause the most destructive damage to the part, particularly when this loading is disproportionate.

In conclusion, this study provides a validated numerical framework for assessing the residual stresses in additively manufactured test coupons. These findings underscore the importance of build orientation and process simulation in designing fatigue-resistant AM components. In future work, it is recommended to validate these predictions

using experimental techniques such as X-ray diffraction and to integrate the calculated residual stress field directly into a fatigue crack initiation and propagation model.

References

1. James MN, Hughes DJ, Chen Z, Lombard H, Hattingh DG, Asquith D, Yates JR, Webster PJ. Residual stresses and fatigue performance. *Engineering Failure Analysis*. 2007;14(2):384–395. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.02.011>
2. Sun W, Ma YU, Li P, Zhang W. Residual stress distribution and Its effect on fatigue crack path of laser powder bed fusion Ti6Al4V alloy. *Aerospace*. 2025;12(2):103. <https://doi.org/10.3390/aerospace12020103> EDN: BAPVGO
3. Reza Kashyzadeh K, Ghorbani S. Fatigue behavior in Inconel alloys produced by 3D printing: A short review. *Journal of Design Against Fatigue*. 2025;3(1):19–36. <https://doi.org/10.62676/jdaf.2025.3.1.20> EDN: XARDUR
4. Pidge PA, Kumar H. Additive manufacturing: A review on 3 D printing of metals and study of residual stress, buckling load capacity of strut members. *Materials Today: Proceedings*. 2020;21:1689–1694. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.012> EDN: GQJGXW
5. Jonaet AM, Park HS, Myung LC. Prediction of residual stress and deformation based on the temperature distribution in 3D-printed parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;113(7):2227–2242. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06711-5> EDN: LCOTWS
6. Reza Kashyzadeh K, Ganjabi MA, Moghbeli S, Ramzi Hassan AN, Khlopkov SV, Laad M. Effects of Surface-level Defects on Tensile and Fatigue Strength of Spot Weld Bonding — Three-sheet Steel. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2026;39(8):1855–1864. <https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.08b.07> EDN: XEQRHG
7. Vasilyeva M, Ammosov D, Vasil'ev V. Finite element simulation of thermo-mechanical model with phase change. *Computation*. 2021;9(1):1–31. <https://doi.org/10.3390/computation9010005> EDN: CNRFQZ
8. Ganjabi MA, Farrahi G, Reza Kashyzadeh K, Amiri N. Effects of various strength defects of spot weld on the connection strength under both static and cyclic loading conditions: empirical and numerical investigation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023;127(11-12):5665–5678. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11923-y> EDN: YLLWMG
9. Reza Kashyzadeh K, Farrahi G, Ahmadi A, Minaei M, Ostad Rahimi M, Barforoushan S. Fatigue life analysis in the residual stress field due to resistance spot welding process considering different sheet thicknesses and dissimilar electrode geometries. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2023;237(1):33–51. <https://doi.org/10.1177/14644207221101069> EDN: CWAKWL
10. Jung CH, Lee MG, Nam C, Jeon Y. Numerical Analysis of Laser Pattern Effects to Residual Stress on Metal 3D Printing. *Applied Sciences*. 2022;12(9):4611. <https://doi.org/10.3390/app12094611> EDN: VKQUMA
11. Zhou J, Barrett RA, Leen S.B. Three-dimensional finite element modelling for additive manufacturing of Ti-6Al-4V components: Effect of scanning strategies on temperature history and residual stress. *Journal of Advanced Joining Processes*. 2022;5:100106. <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2022.100106> EDN: IOPQNJ
12. Promopattum P, Yao SC. Influence of scanning length and energy input on residual stress reduction in metal additive manufacturing: Numerical and experimental studies. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020;49:247–259. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.11.020> EDN: DGTGVQ
13. Said A, Ghorbani S, Reza Kashyzadeh K. Tensile Properties Estimation of 3D Printed Polylactic Acid Samples via Process Parameters using Data-Driven Methods. *7th International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino)*; 2024 Apr 16–19; Moscow, Russian Federation. IEEE; 2024. p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/Inforino60363.2024.10552008>
14. Goh GD, Sing SL, Yeong WY. A review on machine learning in 3D printing: applications, potential, and challenges. *Artificial Intelligence Review*. 2021;54(1):63–94. <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09876-9> EDN: OVJXUC
15. Nguyen PD, Nguyen TQ, Nguyen-Xuan H., Tao QB, Vogel F. A data-driven machine learning approach for the 3D printing process optimisation. *Virtual and Physical Prototyping*. 2022;17(4):768–786. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2068446> EDN: ERBXXY
16. Tamir TS, Xiong G, Fang Q, Yang Y, Shen Z, Zhou M, Jiang J. Machine-learning-based monitoring and optimization of processing parameters in 3D printing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2023;36(9):1362–1378. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2145019> EDN: JQHGSF
17. Reza Kashyzadeh K, Said A, Ghorbani S. Investigation of residual stress due to thermal gradients in 3D-printed Inconel 625: The role of build orientation via finite element analysis. *3rd International Conference on Intelligent Manufacturing and Robotics (ICiMR)*, Sunway University. Malaysia; 2025.

About the authors

Kazem Reza Kashyzadeh, PhD in Technical Sciences, Professor of the Department of Transport Equipment and Technology, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0552-9950; e-mail: reza-kashi-zade-ka@rudn.ru

Siamak Ghorbani, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8272-2337, ORCID: 0000-0003-0251-3144; e-mail: gorbani-s@rudn.ru

Abdesselem Said, PhD student of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0003-2065-823X; e-mail: 1042225267@rudn.ru

Об авторах

Ре́за Каши́и Заде́ Казе́м, кандидат технических наук, профессор кафедры техники и технологий транспорта, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-0552-9950; e-mail: reza-kashi-zade-ka@rudn.ru

Го́рбани Си́амак, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 8272-2337, ORCID: 0000-0003-0251-3144; e-mail: gorbani-s@rudn.ru

Саид Абдесселе́м, аспирант кафедры машиностроительных технологий, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0003-2065-823X; e-mail: 1042225267@rudn.ru