



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

2025 Том 26 № 4

DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-4

<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, Россия

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, Россия

Ответственный секретарь

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

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, Россия

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

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

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

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

Герман Анна — профессор, Университет Бейра-Интернор, 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

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

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

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

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

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

Кузнецов Николай Борисович — профессор, Геологический институт РАН, Москва, Россия

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

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

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

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, Россия

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

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

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, Россия

Спенсер В. Дэвид — профессор, Университет штата Пенсильвания, Юниверсити-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: РИНЦ, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, Dimensions, ResearchBib, Lens, Research4Life, JournalTOCs, British Library, Bodleian Libraries (University of Oxford), Ghent University Library.

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. Шалеева, 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: engi@rudn.ru

Подписано в печать 23.12.2025. Выход в свет 30.12.2025. Формат 60×84/8.

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

Усл. печ. л. 17,90. Тираж 500 экз. Заказ № 1654. 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

2025 Volume 26 Number 4

DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-4

<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, Russia

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, Russia

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, Russia

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, Russia

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 Gitis — 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, Russia

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

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

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

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 (TsNIMash), State Space Corporation "Roscosmos", Korolev, Russia

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, Russia

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, Russia

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, Russia

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, Russia

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

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

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 Russian Index of Science Citation, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, Dimensions, ResearchBib, Lens, Research4Life, JournalTOCs, British Library, Bodleian Libraries (University of Oxford), Ghent University Library.

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 is addressed to researchers, engineers, graduate students. Included in the List of the Leading Scientific Journals and Editions of the Highest Certification Committee of the Ministry of Education and Science of Russian Federation in which the basic results of PhD and Doctoral theses are to be published.

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

Adde Y.A., Razoumny Yu.N., Betelie A.A., Degefu B. Optimizing Space Robot Configurations to Minimize Capture Contact Forces (Оптимизация конфигурации космических роботов для минимизации усилий при захвате)	343
Starkov A.V., Zin M.L., Samusenko O.E., Aung M.T., Nay H.L. Formulation of Satellite-UAVs Integration System for Earth Remote Sensing in the Republic of the Union of Myanmar (Разработка системы интеграции спутников и беспилотных летательных аппаратов для дистанционного зондирования Земли в Республике Союз Мьянма)	359
Устинов А.Н., Атамасов В.Д. Особенности функционирования и способы радиационной защиты космического аппарата с ядерной энергоустановкой в газопылевой плазменной среде собственной внешней атмосферы	376
San Lin Aung. Aircraft Pitch Control Via Parametric Identification and PID Optimization (Управление самолетом по тангажу с помощью параметрической идентификации и ПИД-оптимизации)	388
Белоусов Ю.В., Шамбина С.Л., Рекач Ф.В., Киреев О.Л. Влияние осевой нагрузки на работоспособность шариковых радиальных подшипников	399
Бойков А.А., Самусенко О.Е., Маликов Е.А., Виноградов Е.В., Шишкин И.В., Ромащенко М.Н., Семенцов Д.А. Оптимизация управления предприятиями оборонно-промышленного комплекса с использованием нотации BPMN	412
Сидоров И.Г. Синтез дискретного оптимального многомерного регулятора по неполным данным: многомерный спектральный подход	428
Kurbanov S.V., Andrikov D.A. Agasieva S.V., Iaroshenko A.V. Digital Modelling of Low-Frequency ECG Signals Denoising (Цифровое моделирование снижения шума низкочастотных сигналов ЭКГ)	447
Степанян И.В., Курочкин П.А. Разработка и применение новых цифровых инструментов для организации охраны труда при строительстве Амурского газоперерабатывающего завода	457
Талла Фонганг Т.П. Технология блокчейн для поддержки принятия управленческих решений	466
Лобанов В.К., Кондрашина М.С., Гаджиев Ш.М. Применение генетического алгоритма для задач проектирования магистральных газопроводов	472
Chaplygina E.I., Kruglova L.V., Glavina S.G. The Role of Intelligent Data Processing in Optimizing Companies' Financial Efficiency (Роль интеллектуальной обработки данных в оптимизации финансовой эффективности компаний)	481

CONTENTS

Adde Y.A., Razoumny Yu.N., Betelie A.A., Degefu B. Optimizing Space Robot Configurations to Minimize Capture Contact Forces	343
Starkov A.V., Zin M.L., Samusenko O.E., Aung M.T., Nay H.L. Formulation of Satellite-UAVs Integration System for Earth Remote Sensing in the Republic of the Union of Myanmar	359
Ustinov A.N., Atamasov V.D. Functional Features and Radiation Protection Methods for a Spacecraft with a Nuclear Power Plant in the Gas-Dust	376
San Lin Aung. Aircraft Pitch Control Via Parametric Identification and PID Optimization	388
Belousov Yu.V., Shambina S.L., Rekach F.V., Kireev O.L. Influence of Axial Load on the Performance of Ball Radial Bearings	399
Boykov A.A., Samusenko O.E., Malikov E.A., Vinogradov E.V., Shishkin I.V., Romashchenko M.N., Sementsov D.A. Optimizing the Management of Defense Industry Enterprises Using BPMN Notation ..	412
Sidorov I.G. Synthesis of a Discrete Optimal Multidimensional Controller Based on Incomplete Data: Multidimensional Spectral Approach	428
Kurbanov S.V., Andrikov D.A. Agasieva S.V., Iaroshenko A.V. Digital Modelling of Low-Frequency ECG Signals Denoising	447
Stepanyan I.V., Kurochkin P.A. Development and Experience of Using Digital Tools for the Organization of Labor Protection During the Construction of the Amur Gas Processing Plant	466
Talla Fongang T.P. Blockchain Technology for Managerial Decision Support	457
Lobanov V.K., Kondrashina M.S., Gadzhiev Sh.M. Application of a Genetic Algorithm for Pipeline Route Design	472
Chaplygina E.I., Kruglova L.V., Glavina S.G. The Role of Intelligent Data Processing in Optimizing Companies' Financial Efficiency	481



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-4-343-358
EDN: COWRBD

Research article / Научная статья

Optimizing Space Robot Configurations to Minimize Capture Contact Forces

Yeshurun A. Adde^a✉, Yury N. Razoumny^b,
Araya Abera Betelie^a, Biruk Degefu^a

^a College of Technology & Built Environment-AAiT, Addis Ababa University, Addis Ababa, Ethiopia

^b RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ kibret10@gmail.com

Article history

Received: August 2, 2025
Revised: October 20, 2025
Accepted: October 25, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Funding:

This research received no external funding.

Abstract. Space robotics is rapidly becoming essential as satellites and orbital debris continue to increase, creating demand for reliable capture and servicing technologies. A central challenge lies in minimizing the impact forces generated during contact, which can threaten both the robot and the target. This paper addresses the problem by introducing a configuration optimization approach that leverages the concept of integrated effective mass (IEM) to reduce capture contact forces. The contribution of this study is twofold: it demonstrates how IEM serves as a practical performance metric for predicting capture safety, and it validates configuration optimization as an effective strategy for mitigating impact forces in free-floating space robots. The methodology applied a Hunt — Crossley contact model with hysteresis damping to simulate robot-target interactions under various manipulator configurations. A 7-DOF free-floating robot was modeled, and IEM was computed through Jacobian-based dynamic analysis. The coefficient of restitution was also tuned to balance rebound and capture stability. Results reveal a strong nonlinear relationship between IEM and contact force. Configurations with low IEM generated substantially lower forces: for example, an IEM of 0.0413 kg produced only 442 N, while an IEM of 1.7199 kg resulted in forces exceeding 4142 N. By tuning the restitution coefficient to approximately 0.8, rebound effects were minimized without compromising stability. The simulations confirmed that configuration optimization can reduce capture forces by nearly an order of magnitude while avoiding singularities. In conclusion, this work shows that planning manipulator configurations based on IEM analysis is not merely theoretical but a practical tool for safer, more reliable on-orbit servicing and debris removal. These findings reinforce configuration optimization as a cornerstone for the next generation of space robotic operations.

Keywords: contact force minimization, free-floating robot, integrated effective mass, on-orbit servicing, space robotics

Authors' contribution

Adde Y.A. — conceptualization, methodology, formal analysis, writing — original draft; Razoumny Yu.N. — supervision, validation, writing — review & editing; Betelie A.A. — supervision, validation, writing — review & editing; Degefu B. — investigation, methodology, formal analysis. All authors contributed equally to this paper. All authors read and approved the final paper.

For citation

Adde YA, Razoumny YuN, Betelie AA, Degefu B. Optimizing space robot configurations to minimize capture contact forces. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(4):343–358. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-343-358>

© Adde Y.A., Razoumny Yu.N., Betelie A.A., Degefu B., 2025



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

Оптимизация конфигурации космических роботов для минимизации усилий при захвате

Й.А. Адде^a✉, Ю.Н. Разумный^b, А.А. Бетели^a, Б. Дегефу^a

^a Университет Аддис-Абебы, Аддис-Абеба, Эфиопия

^b Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ kibret10@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 2 августа 2025 г.

Доработана: 20 октября 2025 г.

Принята к публикации: 25 октября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование:

Исследование не имело внешней финансовой поддержки.

Аннотация. Космическая робототехника стремительно развивается ввиду возрастающего числа искусственных спутников Земли и космического мусора, что требует разработки надежных технологий дистанционного захвата объектов и их технического обслуживания. Главная задача заключается в снижении ударных нагрузок, возникающих при механическом взаимодействии роботов с объектами, что представляет угрозу как самому манипулятору, так и цели. Исследована проблема оптимизации конфигурации космических роботов. Предложено использовать концепцию интегрированной эффективной массы (ИЕМ), чтобы снизить контактные усилия при захвате. Исследование показывает, что ИЕМ — это практический показатель эффективности, который помогает прогнозировать безопасность захвата. Также показано, что оптимизация конфигурации является эффективным способом уменьшения силы удара в свободно летающих космических роботах. Для моделирования взаимодействия робота с объектами при разных конфигурациях манипулятора использовалась контактная модель Ханта — Кроссли с гистерезисным демпфированием. Смоделирован свободно плавающий робот с 7-ступенчатой передачей, а ИЕМ рассчитан с помощью динамического анализа на основе матрицы Якоби. Коэффициент демпфирования настроили таким образом, чтобы сбалансировать отскок и стабильность захвата. Результаты показывают сильную нелинейную корреляцию между ИЕМ и силой контакта. Конфигурации с низким ИЕМ вызывали значительно меньшие усилия: например, при ИЕМ в 0,0413 кг зафиксировано всего 442 Н, в то время как при ИЕМ в 1,7199 кг усилия превышали 4142 Н. Оптимизация параметра демпфирующего коэффициента до значения порядка 0,8 позволила существенно минимизировать проявления эффекта рикошета, сохранив при этом требуемый уровень динамической устойчивости системы. Моделирование подтвердило, что оптимизация конфигурации способна уменьшить силы захвата почти на порядок величины, одновременно избегая сингулярностей. Таким образом, показано, что планирование конфигураций манипуляторов на основе анализа ИЕМ является не только теоретическим инструментом, но и практическим средством для повышения безопасности и надежности операций по обслуживанию на орбите и удалению космического мусора. Эти выводы подтверждают важность оптимизации конфигурации как основы для следующего поколения космических роботизированных операций.

Ключевые слова: минимизация контактной силы, свободно летающий робот, интегрированная эффективная масса, обслуживание на орбите, космическая робототехника

Вклад авторов:

Адде Й.А. — разработка концепции исследования, методологии, формальный анализ, написание первого варианта статьи; Разумный Ю.Н. — научное руководство, проверка, подготовка статьи к публикации; Бетели А.А. — научное руководство, проверка, подготовка статьи к публикации; Дегефу Б. — проведение исследования, методология, формальный анализ. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования:

Adde Y.A., Razoumny Yu.N., Betelie A.A., Degefu B. Optimizing space robot configurations to minimize capture contact forces // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 4. С. 343–358. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-343-358>

Introduction

The Earth's orbit is becoming dangerously congested. With thousands of active satellites now sharing space with retired spacecraft and millions of debris fragments, the risk of collisions is increasing at an alarming pace [1; 2]. To maintain orbital operations sustainable, robotic capture and servicing technologies have emerged as vital tools for debris removal, satellite life extension, and in-orbit repair [3;4]. Free-floating robotic manipulators, in particular, offer unique capabilities for these missions. However, a serious challenge remains: when a robot arm makes contact with a satellite or debris, the resulting forces can damage sensitive components or destabilize the servicing spacecraft itself [5; 6]. Therefore, reducing the capture contact forces is essential for safe and reliable operation.

Various approaches have been explored to address this issue. Simple spring-damper models provided an early approximation of contact but failed to capture nonlinear energy dissipation. Advanced formulations such as Hunt — Crossley [7] and Lankarani — Nikravesh [8] incorporated hysteresis damping and offered more realistic force–deformation predictions. Alternative models, including Lee — Wang [9], Flores et al. [10], Gonthier et al. [11], and Hu — Guo [12], further extended the modeling landscape. In parallel, control methods have evolved: sliding mode control [5], impedance and admittance control [13; 14], adaptive control [15], and prescribed performance control [16] were all developed to regulate manipulator behavior. Hybrid force/motion strategies [17] and trajectory optimization approaches [18; 19] further sophistication, whereas reinforcement learning [20; 21; 22] provided data-driven adaptability under uncertainty.

Despite this progress, limitations persist. Many studies assume rigid targets [23; 24] and single-point contacts [14], ignoring flexible appendages and multi-contact realities in orbit. Others emphasize trajectory planning [25; 26] but underplay the influence of manipulator configuration. Studies on effective mass [27; 28] confirmed that a robot's apparent inertia directly affects impact severity,

and singularity analyses [29; 30] highlighted the risks of unstable postures. However, few efforts have integrated these insights into a configuration optimization framework.

The contribution of this study is the development of a configuration optimization framework that uses integrated effective mass (IEM) as a guiding metric to minimize the capture contact forces. By combining nonlinear Hunt — Crossley modeling, Jacobian-based IEM analysis, and evaluation of manipulator configurations, this study demonstrates that contact forces can be reduced by nearly an order of magnitude while avoiding singularities. This contribution shifts the configuration from a background parameter to a central design tool for safer on-orbit servicing and debris removal.

1. Literature Review

The problem of safe capture in space robotics has driven extensive search across modeling, control, and optimization. Early studies often relied on simple spring-damper systems [31], which offered basic insights but failed to capture the nonlinearities inherent in contact. To improve the realism, Hunt and Crossley [7] and Lankarani and Nikravesh [8] introduced nonlinear damping models that incorporated hysteresis and better reflected energy dissipation. Comparative studies by Flores et al. [32], Gonthier et al. [11], and Hu — Guo [12] confirmed the advantages of these models, with Hunt — Crossley proving especially effective.

Control methods were another major line of research. Sliding mode control [34] became popular because of its robustness against uncertainties, whereas impedance [35] and admittance control [36] enforced compliance at the manipulator — target interface. Adaptive schemes [37] and prescribed performance control [38] offered resilience against modeling errors, and hybrid force/motion frameworks [39] sought to unify trajectory tracking with force regulation. More recent approaches integrated learning with reinforcement learning methods [40], allowing robots to adapt to unstructured environments.

Optimization-based strategies have complemented these advances. Trajectory optimization

[41; 42] produced smoother motions that reduced peak impact loads. Particle swarm optimization [43; 44] and deep learning methods [45] expanded the toolkit for path planning under uncertainty. Simultaneously, configuration optimization [46; 47] emerged as a promising method, emphasizing that the manipulator posture itself is a determinant of the contact force. This idea is closely linked to the concept of effective mass [46], which quantifies the apparent inertia of a manipulator in the direction of contact. Research on singularity analysis [48; 49] further highlighted how poor configurations can destabilize capture operations.

Despite this breadth of research, significant gaps remain. Many models assume rigid targets [37; 46] and simplified contact conditions [50] whereas real-world missions involve flexible structures and multi-contact dynamics. Learning-based controllers [51–53] have demonstrated adaptability but typically prioritize motion planning over posture optimization. Consequently, the explicit use of the integrated effective mass as a central metric for configuration optimization remains underexplored. This study addresses this gap by presenting a unified framework that combines nonlinear Hunt — Crossley modeling, Jacobian-based IEM analysis, and systematic configuration optimization to reduce capture forces in space robotics.

2. Methodology

Understanding the behavior of contact forces during robotic interactions in space is essential for the safe and effective performance of manipulators in missions such as satellite servicing and debris removal. This study employed a physics-based modeling and simulation approach to estimate, minimize, and regulate these forces under micro-gravity conditions. The 7-DOF KUKA LBR R800 manipulator [54] (Figure 1), with its 800 mm maximum reach, was adopted as the reference system, as this reach defined the manipulator's operational workspace and influenced the capture dynamics. The methodology focuses on determining the integrated effective mass (IEM) and related

dynamic parameters, providing a foundation for configuration optimization and impact force reduction during on-orbit capture operations.



Figure 1. The 7-DOF KUKA LBR iiwa R800 manipulator

Source: by KUKA Roboter GmbH.
LBR iiwa — product specification sheet, version v5.
Technical datasheet. Augsburg, Germany, 2015.
Available from: <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots/lbr-iiwa>
(accessed: 12.05.2024)

2.1. Contact Force Modeling

In orbital environments where gravity is negligible, the interaction of a robotic manipulator with a target object, such as a tumbling satellite, results in complex contact dynamics. These interactions are governed by parameters such as the relative velocity, stiffness of the contact interface, damping, and, crucially, the apparent or effective mass along the direction of contact.

Traditional linear models are often insufficient for realistically modeling these forces. Instead, nonlinear formulations, such as the Hunt — Crossley model, are preferred because they incorporate hysteresis damping, a mechanism that better captures energy dissipation during impact. This allowed for a more accurate estimation of both the peak forces and deformation during contact.

Mathematically, the Hunt — Crossley model represents the contact force F as [32; 56–58]

$$F_{\max} = \kappa f(m_e),$$

where $\kappa = kl^{\alpha/(\alpha+1)}$,

$$l = \frac{(\alpha+1)m_t}{\lambda^2} \left[\lambda \dot{\mathcal{J}}(0) + k \ln \left| \frac{k}{\lambda \dot{\mathcal{J}}(0) + k} \right| \right]$$

and

$$f(m_e) = \left(\frac{1}{1 + m_t / m_e} \right)^{\alpha/(\alpha+1)}.$$

For single-point and no-friction assumptions, the classical model of the contact force, which incorporates a spring and damper in parallel connecting the contact points, is [58]:

$$F = K\delta^\alpha + \lambda\delta^\alpha\dot{\delta},$$

where K is the stiffness parameter, δ , $\dot{\delta}$ represent the deformation and deformation velocity; α is the

nonlinear power exponent, which is considered to be 1.5 in most cases, and λ is called the hysteresis damping factor with several classical expressions shown in Table 1.

This model, along with the variants proposed by Lee and Wang [9], Gonthier et al. [11], and Flores et al. [10], allows impact events to be simulated with greater accuracy. However, among all the compared formulations, the Hunt — Crossley model offers the most reliable balance between computational simplicity and physical realism, particularly in returning to a zero-force state post-deformation (i.e., capturing elastic recovery accurately) [58].

Table 1

Classical Expressions of Hysteresis Damping Factor

Model	Hysteresis Damping Factor	Model	Hysteresis Damping Factor
Herbert — McWhannell	$\lambda = \frac{6(1-c_r)}{((2c_r-1)^2+3)} \frac{K}{\dot{\delta}^{(-)}}$	Hunt — Crossley	$\lambda = \frac{3(1-c_r)}{2} \frac{K}{\delta^{(-1)}}$
Lankarain — Nikraves	$\lambda = \frac{3(1-c_r^2)}{4} \frac{K}{\dot{\delta}^{(-)}}$	Lee — Wang	$\lambda = \frac{3(1-c_r)}{4} \frac{K}{\delta^{(-1)}}$
Flores et al. [10]	$\lambda = \frac{8(1-c_r)}{5c_r} \frac{K}{\dot{\delta}^{(-)}}$	Gonthier et al. [11]	$\lambda = \frac{1-c_r^2}{c_r} \frac{K}{\hat{\delta}^{(-)}}$
Zhiying — Qishao	$\lambda = \frac{3(1-c_r^2)e^{2(1-c_r)}}{4} \frac{K}{\dot{\delta}^{(-)}}$	Hu — Guo	$\lambda = \frac{3(1-c_r)}{2c_r} \frac{K}{\dot{\delta}^{(-)}}$

Source: by P. Flores and H.M. Lankarani [10]

The maximum deformation occurs when the final velocity is zero, thus for maximum deformation between the manipulator and the target, the maximum force of contact can be determined by 6 N:

$$\delta_{\max} = \left(\frac{M_{ie}(\alpha+1)}{\lambda^2} \left(\lambda\dot{\delta}^{(-)} + K \ln \left| \frac{K}{\lambda\dot{\delta}^{(-)} + K} \right| \right) \right)^{\frac{1}{\alpha+1}}$$

$$F_{\max} = K \left(\frac{M_{ie}(\alpha+1)}{\lambda^2} \left(\lambda\dot{\delta}^{(-)} + K \ln \left| \frac{K}{\lambda\dot{\delta}^{(-)} + K} \right| \right) \right)^{\frac{\alpha}{\alpha+1}};$$

2.2. Hysteresis Damping Factor Comparison

A critical aspect of realistic force modeling is the selection of the damping factor, λ , which dictates how energy is dissipated. As seen in comparative simulations, while models like Lankarani — Nikraves [8] and Lee — Wang [9] exhibit good dissipation, the Hunt — Crossley [7] model minimizes estimation error for maximum contact force and better reflects post-impact behavior.

To choose the best model to determine the hysteresis damping factor, which is a critical parameter for showcasing the maximum contact

force created between the tumbling target and the robotic manipulator, the relationship between the deformation and contact force was modeled as shown in Figure 1. The figure shows the curve of the contact force with respect to deformation, where

$$M_{ie} = 1 \text{ kg}, K = 10^9 \text{ N/m}^{1.5}, \dot{\delta}^{(-)} = 0.2 \text{ m/s},$$

and $c_r = 0.5$, and the different models of the hysteresis damping factor are adopted.

Figure 2 was plotted using the equations from [10] and simulated in MATLAB to observe the performance of each model. Based on these simulations, among the various numerical models analyzed, the Hunt — Crossley model demonstrated the most promising performance in estimating the maximum contact force with minimal error between the tumbling target and the robotic manipulator. Additionally, its force-displacement loop exhibited a tendency to return to zero more effectively than the other models.

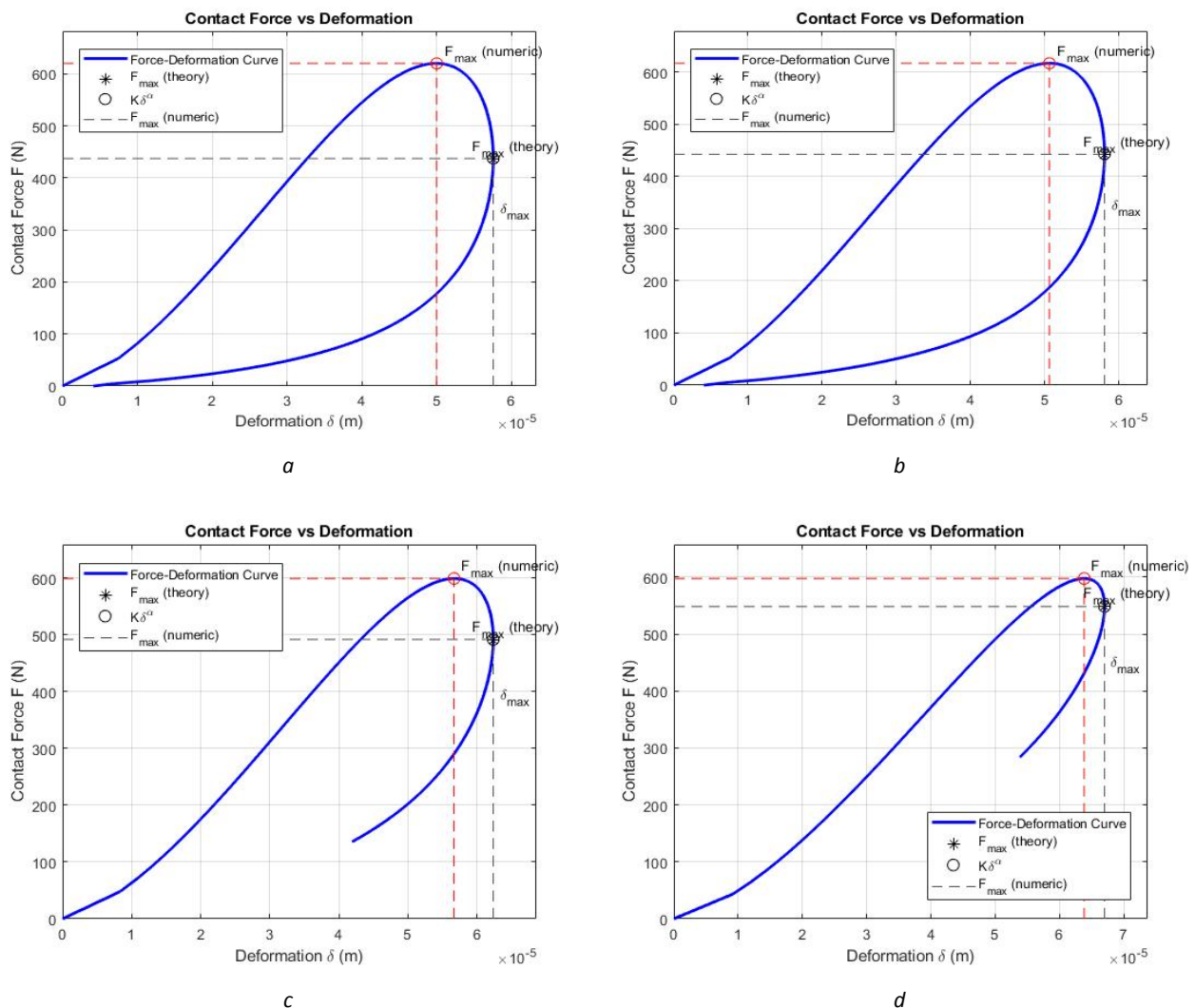


Figure 2. Curve of contact force with respect to deformation for different models of hysteresis damping factor:

a — Herbert — McWhannell Model; *b* — Lankarain — Nikravesh Model; *c* — Flores et al. Model;
d — Zhiying — Qishao Model; *e* — Hunt — Crossley Model; *f* — Lee — Wang Model;
g — Gonthier et al. Model; *h* — Hu — Guo Model

Source: by P. Flores and H. M. Lankarani [10]

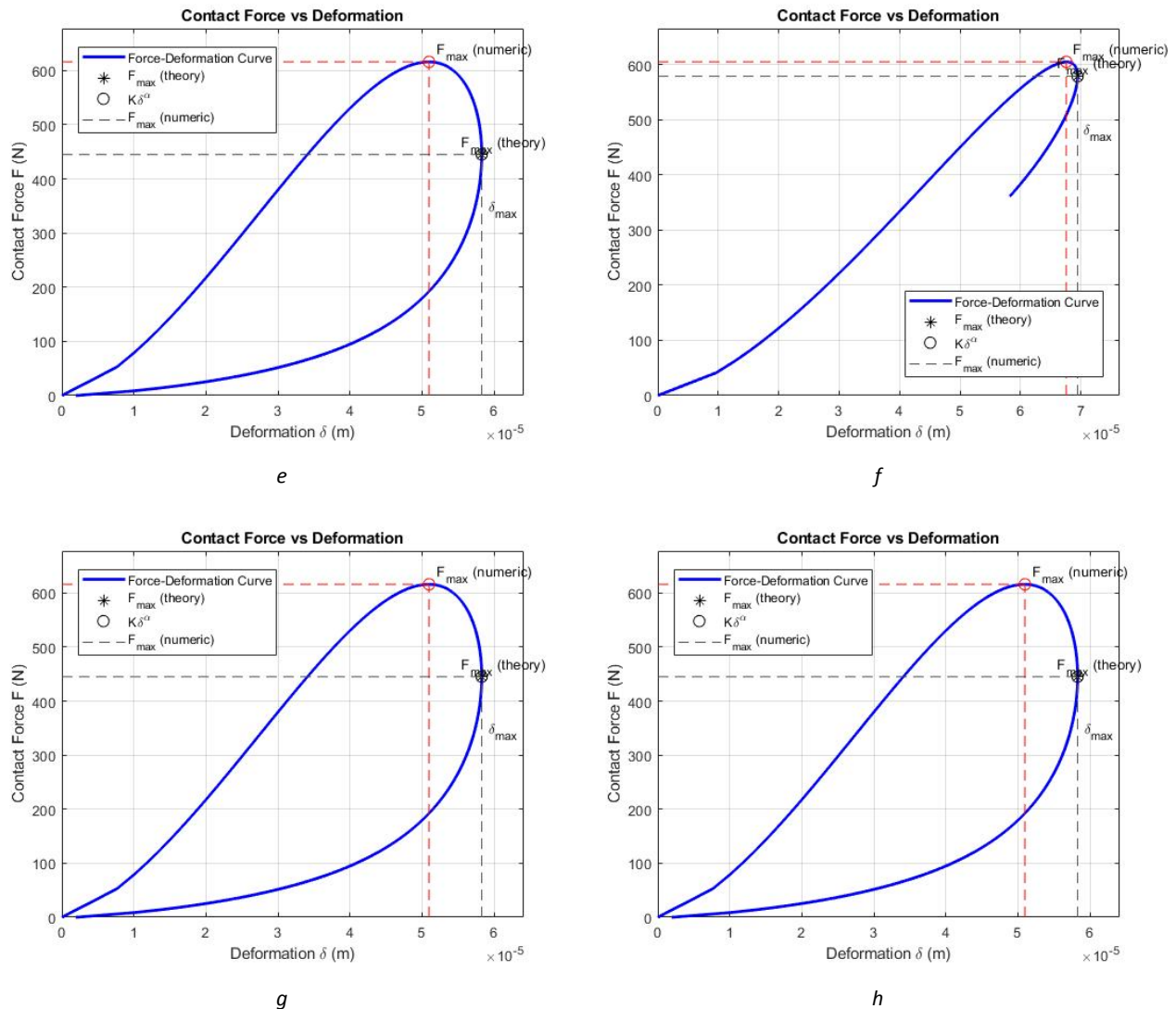


Figure 2 (Ending). Curve of contact force with respect to deformation for different models of hysteresis damping factor:

a — Herbert — McWhannell Model; *b* — Lankarain — Nikraves Model; *c* — Flores et al. Model; *d* — Zhiying — Qishao Model; *e* — Hunt — Crossley Model; *f* — Lee — Wang Model; *g* — Gonthier et al. Model; *h* — Hu — Guo Model

Source: by P. Flores and H. M. Lankarani [10]

2.3. Coefficient of Restitution (CR)

Another key parameter is the coefficient of restitution, which is defined as the ratio of the post-impact to pre-impact relative velocities. It effectively measures how “bouncy” a collision is and thus determines the extent of rebound. A higher CR (e.g., 0.9) implies more energy retention (greater rebound), whereas a lower CR (e.g., 0.7) reduces the rebound but increases the energy

dissipation. In space applications, a balanced CR of approximately 0.8 is optimal, as it minimizes rebound without causing excessive deformation or prolonging the contact duration, which could destabilize the robot or the captured object [58; 59].

2.4. Integrated Effective Mass (IEM)

The concept of Integrated Effective Mass (IEM) quantifies the inertia of the manipulator in the direction of contact. It is derived from the

dynamic parameters of the manipulator using the Jacobian matrix J , which maps the joint velocities to the end-effector velocities. The IEM is derived from the effective mass of the system. The effective mass is the apparent inertia of a robotic manipulator (or object) in a particular direction of motion or force, and it quantifies the resistance offered by the end effector of a robot when a force is applied in a given direction. Mathematically, this is represented as

$$M_e = \left(\mathbf{n}^T \left(J M^{-1} J^T \right)^{-1} \mathbf{n} \right)^{-1},$$

where: J = Jacobian matrix (linear velocity part); M = inertia matrix in joint space; $\mathbf{n}$ = unit vector along the contact direction;

The integrated effective mass is a cumulative or averaged measure of the effective mass across a range of configurations, or along a manipulator path. It captures the overall dynamic behavior of the robot during a capture or contact maneuver involving multiple joints and motion segments.

The total mass of the system can be expressed using the integrated effective mass of a continuous object (robotic manipulator) as follows:

$$M_{ie} = \frac{1}{\mathbf{u}_n^T \left(-\mathbf{r}_{tp} \times \mathbf{I}_t^{-1} \mathbf{r}_{tp} \times + \frac{m_e + m_t}{m_t m_e} E \right) \mathbf{u}_n},$$

where $\mathbf{u}_n$ — the unit norm direction vector; $\mathbf{r}_{tp}$ — the vector from mass center of target to contact

point; m_e, m_t — effective mass of the robotic manipulator and mass of mass of the target respectively.

The effective mass of the robotic manipulator depicts the total mass as a continuous object and is determined as follows [60; 61]:

$$m_e = \frac{1}{\mathbf{u}^T \hat{H}_v^{-1} \mathbf{u}},$$

where $\mathbf{u}$ is a unit direction vector, m_e is called the effective mass, and $\hat{H}_v = \left(J_{b_mv} H^{-1} J_{b_mv}^T \right)^{-1}$ with J_{b_mv} the Jacobian matrix corresponding to the linear velocity.

2.5. Jacobian Modeling and DH Parameters

Before determining the effective mass of the end effector, the Jacobian matrix for the robotic manipulator must be determined. For the 7-DOF free-floating space robot (modeled after the KUKA system), the Jacobian is derived using Denavit–Hartenberg parameters. This mathematical framework allows the mapping of joint-space motion to the robot’s operational space [62]. A symbolic, compact form of the Jacobian matrix was used to compute the dynamic behavior and ultimately evaluate the effective mass across different configurations [63]. The D-H parameters for the KUKA robot shown in Figure 3 are listed in Table 2.

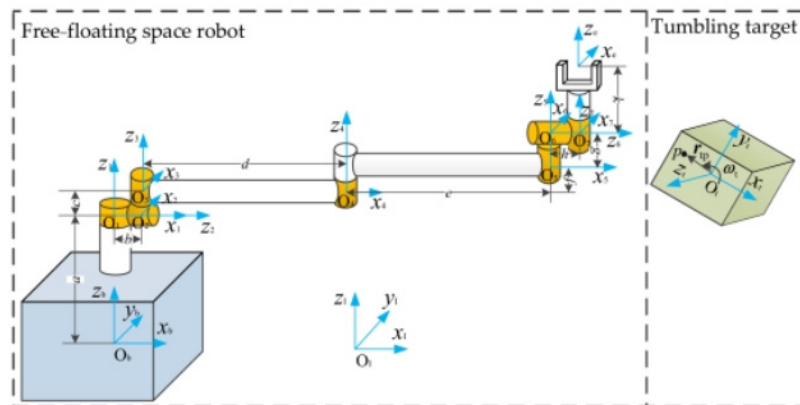


Figure 3. The 2D orientation of 7-DOF free-floating space robot capturing tumbling target

Source: by L. Zhang [54]

Table 2

D-H Parameter of seven DOF KUKA robot

Link	$a_{i-1}(m)$	$\alpha_{i-1}(^\circ)$	$d(m)$	$\theta_i(^\circ)$
1	0	0	0.6	θ_1
2	0	90	0	θ_2
3	0	-90	0	θ_3
4	1	0	0	θ_4
5	1	0	0.2	θ_5
6	0	90	0.2	θ_6
7	0	-90	0	θ_7

Source: by J. Chimento [62]

The Jacobian matrix below has been compacted by symbolizing only entries with more than two mathematical operations.

Trigonometric shorthand was used as follows:

$$s_{456} = \sin(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6).$$

$$\text{Full Jacobean Matrix } J(\theta) = \begin{bmatrix} J_V \\ J_W \end{bmatrix};$$

$$J_V = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & -c_{12} * (0.6 * c_3 + c_4 * s_3 + c_4 * c_5 * s_3 - s_3 * s_4 * s_5) & J_{14} & J_{15} & 0 & 0 \\ J_{21} & J_{22} & s_{12} * (0.6 * c_3 + c_4 * s_3 + c_4 * c_5 * s_3 - s_3 * s_4 * s_5) & J_{24} & J_{25} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 * c_4 - 0.6 * s_3 + c_3 * c_4 * c_5 - c_3 * s_4 * s_5 & -s_3 * (s_4 + s_{45}) & -s_3 * s_{45} & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$J_W = \begin{bmatrix} 0 & 0 & s_{12} & -s_3 * c_{12} & -s_3 * c_{12} & -s_3 * c_{12} & J_{47} \\ 0 & 0 & -c_{12} & -s_3 * s_{12} & -s_3 * s_{12} & -s_3 * s_{12} & J_{57} \\ 1 & 1 & 0 & c_3 & c_3 & c_3 & s_3 * s_{456} \end{bmatrix};$$

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & -c_{12} * (0.6 * c_3 + c_4 * s_3 + c_4 * c_5 * s_3 - s_3 * s_4 * s_5) & J_{14} & J_{15} & 0 & 0 \\ J_{21} & J_{22} & s_{12} * (0.6 * c_3 + c_4 * s_3 + c_4 * c_5 * s_3 - s_3 * s_4 * s_5) & J_{24} & J_{25} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 * c_4 - 0.6 * s_3 + c_3 * c_4 * c_5 - c_3 * s_4 * s_5 & -s_3 * (s_4 + s_{45}) & -s_3 * s_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & & -s_3 * c_{12} & -s_3 * c_{12} & -s_3 * c_{12} & J_{47} \\ 0 & 0 & & -s_3 * s_{12} & -s_3 * s_{12} & -s_3 * s_{12} & J_{57} \\ 1 & 1 & 0 & c_3 & c_3 & c_3 & s_3 * s_{456} \end{bmatrix}.$$

The effective mass of the end-effector is derived from the Jacobian matrix of the system using the dynamic parameters of the space robot

listed in Table 3. The corresponding simulation results using MATLAB for the effective mass are presented in Table 4.

Table 3

Dynamic Parameter of the Robot

Part	m_i, kg	$I_i, \text{kg m}^2$
Link 1	5	diag([0.01, 0.02, 0.02])
Link 2	5	diag([0.02, 0.01, 0.02])
Link 3	10	diag([0.84, 0.01, 0.84])
Link 4	10	diag([0.01, 0.84, 0.84])
Link 5	5	diag([0.02, 0.02, 0.01])
Link 6	5	diag([0.02, 0.02, 0.01])
Link 7	8	diag([0.03, 0.03, 0.01])
Base	1,000	diag([500, 500, 500])
Target	200	diag([100, 100, 100])

Source: by L. Skrinjar, J. Slavić, and M. Boltežar [55]

Table 4

Effective Mass of the End Effector

N _o	Configuration	Effective Mass, kg
1	30, -55, 60, -70, 35, 20, -40	1.7377
2	-20, 85, -110, 30, -45, 60, 150	0.0413
3	90, -75, 40, -130, 70, 15, -20	1.6088
4	-60, 120, -35, 55, 100, 80, 25	0.7090
5	10, -140, 95, -15, 60, -10, 130	0.1348
6	-85, 40, -70, 20, -11, 120, 55	0.2359
7	135, -50, 75, -90, 15, 100, -35	0.0841
8	-30, 110, -100, 70, 40, -20, 60	0.1355
9	70, -100, 55, -45, 140, -60, 5	0.2162
10	-150, 25, -20, 115, -95, 45, -70	0.4346

Source: by S. Doliwa [63]

2.6. Singularity Analysis

Singularity analysis plays a critical role in ensuring that a free-flying space robot never reaches a state of uncontrollability, where motion along one or more Cartesian directions becomes impossible or demands unrealistically large joint velocities. A singularity occurs when the manipulator's Jacobian matrix $J(\theta)$ loses rank, thereby reducing its ability to map joint velocities into end-effector velocities [64].

For a redundant 7-DOF manipulator, such as the KUKA LBR considered in this study, singularities may appear in specific configurations where the rank of J drops below six. This condition typically arises due to certain joint alignments, which lead to the loss of motion capability in one or more directions and, consequently, the risk of control instability [65; 66].

In this study, singularity tests were performed across ten representative configurations, as shown in Table 4, using a MATLAB simulation. The results of the evaluation on singularity are presented in Table 5 below. In every case, the Jacobian maintained full rank ($\text{Rank}(\mathbf{J}) = 6$), indicating that none of the chosen poses were singular.

Table 5

Singularity of 7-DOF Space Robots

Configuration	Rank	Singularity
1	$\text{Rank}(\mathbf{J}) = 6$	Not Singular
2	$\text{Rank}(\mathbf{J}) = 6$	Not Singular
3	$\text{Rank}(\mathbf{J}) = 6$	Not Singular
4	$\text{Rank}(\mathbf{J}) = 6$	Not Singular
5	$\text{Rank}(\mathbf{J}) = 6$	Not Singular
6	$\text{Rank}(\mathbf{J}) = 6$	Not Singular
7	$\text{Rank}(\mathbf{J}) = 6$	Not Singular
8	$\text{Rank}(\mathbf{J}) = 6$	Not Singular
9	$\text{Rank}(\mathbf{J}) = 6$	Not Singular
10	$\text{Rank}(\mathbf{J}) = 6$	Not Singular

Source: by A. Mueller [66]

However, points along a trajectory may approach near-singular conditions, underscoring the importance of careful motion planning. Entering a singular configuration during microgravity ope-

rations can significantly amplify manipulator — base coupling effects, driving joint torques beyond their limits and potentially destabilizing the spacecraft attitude [68].

Once the singularity of the workspace has been identified, IEM of the space robot manipulator at a given configuration can be easily determined using the equation M_{ie} . Therefore, singularity analysis should not be treated as a routine mathematical exercise but as a vital safety measure for ensuring robust, stable, and precise capture maneuvers in free-flying space robotics.

3. Results and Discussion

3.1. Numerical Simulation of a 7-DOF Free-Floating Space Robot

A 7-DOF free-floating space robot with $a = 0.6$ m, $b = 0.2$ m, $c = 0.2$ m, $d = 1.0$ m, $e = 1.0$ m, $f = 0.2$ m, $g = 0.2$ m, $h = 0.2$ m and $k = 0.6$ m. $r_{tp} = [-0.25, 0.15, 0.1]$ m and $\omega_t = [1, -0.5, 2]$ deg/s are both expressed in the target coordinate frame [54]. The unit vector according to the calculation is expressed as follows:

$$u_n = [0.431, -0.267, 0.862].$$

The dynamics parameters of the space robot and target are listed in Table 1.

Table 6 was derived from the M_{ie} equation above and computed using MATLAB. It summarizes the simulated integrated effective mass (M_{ie}) for each configuration. It also lists the simulated maximum contact force during on-orbit servicing between the space robot manipulator and the target, which was obtained using the Hunt — Crossley model with a hysteresis damping factor.

From Table 6, we can see that the maximum force has different values for different integrated effective masses, which are the results obtained by randomly varying the configuration ten times. The reduced maximum contact force created between the robotic manipulator and the tumbling target was observed in configuration 2.

Figure 4 was plotted using MATLAB from the data in Table 6 and reveals that as the integrated

effective mass increases, the contact force during space robot captures increases nonlinearly, particularly beyond a certain threshold. This indicates a higher momentum transfer and impact severity.

Minimizing IEM is essential for reducing capture forces and ensuring safer and more stable robotic interactions during satellite servicing and debris capture missions.

Table 6

Integrated Effective Mass for Different Configuration

N_0	Configuration	Integrated Effective Mass, kg	Maximum Force, N
1	30, -55, 60, -70, 35, 20, -40	1.7199	4.1421e + 03 N
2	-20, 85, -110, 30, -45, 60, 150	0.0413	4.4207e + 02 N
3	90, -75, 40, -130, 70, 15, -20	1.5935	3.9567e + 03 N
4	-60, 120, -35, 55, 100, 80, 25	0.7060	2.4278e + 03 N
5	10, -140, 95, -15, 60, -10, 130	0.1347	8.9855e + 02 N
6	-85, 40, -70, 20, -11, 120, 55	0.2355	1.2564e + 03 N
7	120, -40, 60, -70, 35, 60, -20	0.0841	6.7733e + 02 N
8	-30, 110, -100, 70, 40, -20, 60	0.1354	9.0135e + 02 N
9	70, -100, 55, -45, 140, -60, 5	0.2159	1.1925e + 03 N
10	-150, 25, -20, 115, -95, 45, -70	0.4334	1.8116e + 03 N

Source: by L. Zhang [54]

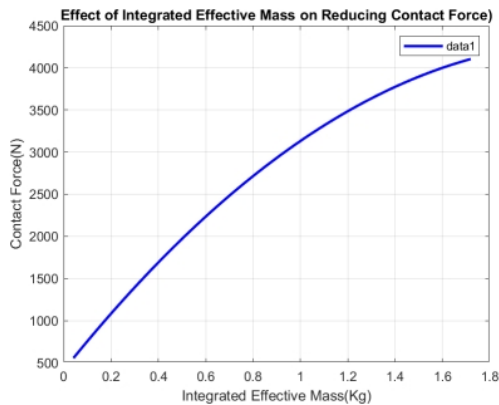


Figure 4. Effect of Integrated Effective Mass to Reduce Contact Force

Source: by P. Flores and H.M. Lankarani [10]

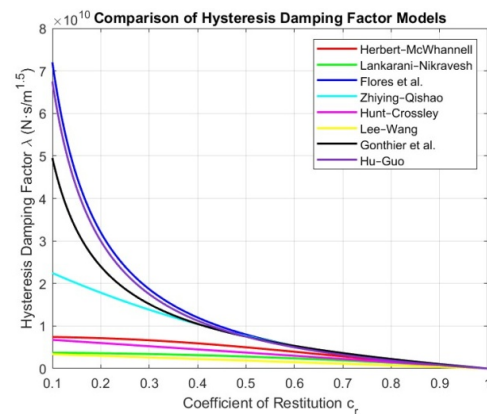


Figure 5. Comparison of Hysteresis Damping factor for different models

Source: by P. Flores and H.M. Lankarani [10]

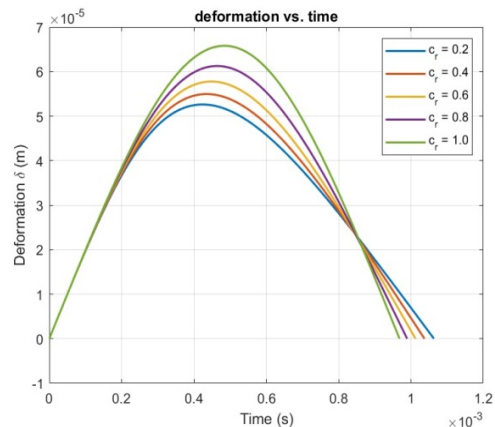
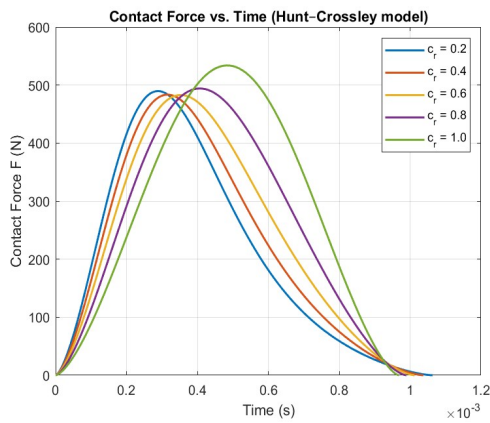


Figure 6. Effects of Coefficient of Restitution the Maximum Force And Deformation

Source: by P. Flores and H.M. Lankarani [10]

As demonstrated in the above figure (Figure 5), the contact models of Lee — Wang, Lankarani — Nikravesh, Herbert — McWhannell, and Hunt — Crossley exhibit reduced dissipation energy owing to their diminished hysteresis damping factor. However, from the figure, we can see that the Lee-Wang, Lankarani — Nikravesh, and Herbert — McWhannell models have higher deformation than the Hunt — Crossley model. For the above reasons, the Hunt — Crossley contact force model was selected to model the contact forces between the robotic manipulator and the tumbling target.

When the coefficient of restitution was reduced, the maximum force and maximum deformation were reduced; however, this resulted in an increase in the contact duration, which resulted in energy dissipation, as shown in Figure 6. Therefore, it is necessary to use a coefficient of restitution of approximately 0.8. Figure 7 shows the simulation performed in MATLAB to compare the theoretical data with the numerical data to verify the results in depicting the error propagation. Consequently, we can observe from the figure that the error between the maximum theoretical and numeric forces was significantly reduced, as shown in Figure 7.

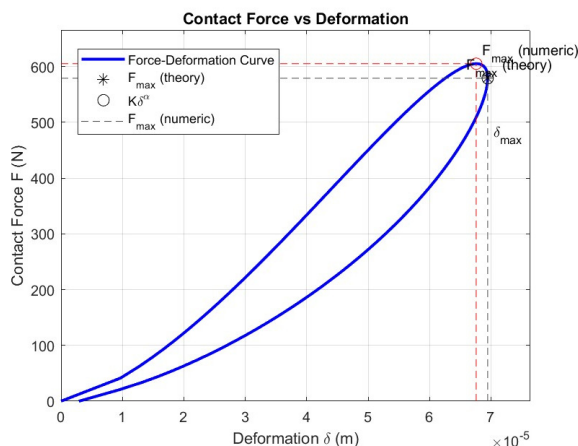


Figure 7. Reduced Error

Source: by P. Flores and H.M. Lankarani [10]

Conclusion

This study demonstrated how the configuration of a free-floating 7-DOF space robot strongly influences the capture dynamics during satellite servicing and debris removal. By analyzing the

integrated effective mass (IEM) across different joint configurations, it was observed that the contact forces increased nonlinearly with the IEM. Capture forces were dramatically reduced by nearly an order of magnitude in low-IEM configurations compared to higher IEM poses. For instance, an IEM of 0.0413 kg produced only 442 N, whereas an IEM of 1.7199 kg generated more than 4142 N. The Hunt — Crossley model was effective in representing the contact dynamics, and a restitution coefficient of approximately 0.8 provided a good balance between reducing the rebound and maintaining the capture reliability. These results confirm that configuration optimization guided by IEM analysis is a powerful strategy for ensuring safe, more stable, and reliable space robot operations. However, this study assumes rigid targets and ideal conditions, overlooking flexible structures, multi-contact, and sensor noise. Future efforts should integrate trajectory planning, flexible modeling, and adaptive learning-based control to address uncertainties, paving the way for more robust, efficient, and sustainable space robotics missions.

References

1. Nomura K, Rella S, Merritt H, Baltussen M, Bird D, Tjuka A, and Falk D. Tipping points of space debris in low earth orbit. *International Journal of the Commons*. 2024;18(1):17–31. <https://doi.org/10.5334/ijc.1275> EDN: GKQPVS
2. Iacomino C, Rossi A, Saputo A. *Earth's Orbits at Risk: The Economics of Space Sustainability*. Paris: OECD Publ.; 2022. <https://doi.org/10.1787/16543990-en>
3. Alizadeh M, Zhu ZH. A comprehensive survey of space robotic manipulators for on-orbit servicing. *Frontiers in Robotics and AI*. 2014;11:1470950. <https://doi.org/10.3389/frobt.2024.1470950>
4. Opromolla R, Grishko D, Auburn J, Bevilacqua R, Buinhas L, Cas-sady J, Jäger M, Jankovic M, Rodriguez J, Perino MA, Bastida-Virgili B. Future in-orbit servicing operations in the space traffic management context. *Acta Astronautica*. 2024;220:469–477. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.05.007> EDN: NRCHSI
5. Dou Bo, Yue X. Fractional-order sliding mode control for free-floating space manipulator with disturbance and input saturation. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. 2025;35(8):3094–3115. <https://doi.org/10.1002/rnc.7826> EDN: PSHHGT
6. Zhang O, Liu Z, Shao X, Yao W, Wu L, and Liu J. Learning-based task space trajectory planning frame-work

with pre-planning and post-processing for uncertain free-floating space robots. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2025;61(3):6325–6338. <https://doi.org/10.1109/TAES.2025.3527428>

7. Hunt KH, and Crossley FRE. Coefficient of restitution interpreted as damping in vibroimpact. *J. Appl. Mech.* 1975;42(2):440–445. <https://doi.org/10.1115/1.3423596>

8. Lankarani HM, Nikravesh PE. A contact force model with hysteresis damping for impact analysis of multibody systems. *Journal of Mechanical Design*. 1990;112(3):369–376. <https://doi.org/10.1115/1.2912617>

9. Lee TW, Wang A. On the dynamics of intermittent-motion mechanisms. Part 1: dynamic model and response. *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*. 1983;105(3):534–540.

10. Flores P, Lankarani HM. *Contact Force Models for Multibody Dy-Namics*. Springer Publ.; 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30897-5>

11. Gonthier Y, McPhee J, Lange Ch, Piedboeuf JC. A regularized contact model with asymmetric damping and dwell-time dependent friction. *Multibody System Dynamics*. 2004;11(3):209–233. EDN: FLISJJ

12. Hu S, Guo X. A dissipative contact force model for impact analysis in multibody dynamics. *Multibody System Dynamics*. 2015;35(2):131–151. <https://doi.org/10.1007/s11044-015-9453-z> EDN: SJEORG

13. Chihi M, Ben Hassine C, and Q. Hu Q. Segmented hybrid impedance control for hyper-redundant space manipulators. *Applied Sciences*. 2025;15(3):1133. <https://doi.org/10.3390/app15031133> EDN: SUBEAM

14. Xiang R, Xu H, Li X, Zhu X, Meng D, and Xu W. Compliance control of a cable-driven space manipulator based on force–position hybrid drive mode. *Aerospace*. 2025;12(1):69. <https://doi.org/10.3390/aerospace12010069> EDN: GHBQGG

15. Zalewski K, Zakrevsky A, Virtanen M, Svensson J, Joe A, Wilson J. Deep neural network enhanced modeling and adaptive control of a malfunctional spacecraft under unknown accessory breakage. *Mechanical Engineering Advances*. 2025;3(1):2469–2469. <https://doi.org/10.59400/mea2469>

16. Yang Z, Yang B, Ji R, Wang T, and Ma J. z-Ary compression event-triggered control for spacecraft with adhesive-resilient prescribed performance. *Mathematics*. 2025;13(3):386. <https://doi.org/10.3390/math13030386>

17. Hu H, Wen S, J. Yu J. Prescribed time control of position and force tracking for dualarm robots with output error constraints. *Scientific Reports*. 2025;15(1):3170. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86783-5> EDN: OLVGCR

18. Junkang Y, Wei J, Chuang G, Dehua Z, Wei C, and Hongjun L. Trajectory optimization method of terminal self-reconfiguring live working robot based on fourier series. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering*

Science. 2025;239(9):3360–3378. <https://doi.org/10.1177/09544062241304876> EDN: STBNLB

19. Becker M, Caspers P, Lilge T, Haddadin S, and Müller MA. Informed circular fields: a global reactive obstacle avoidance framework for robotic manipulators. *Frontiers in Robotics and AI*. 2025;11:1447351. <https://doi.org/10.3389/frobt.2024.1447351>

20. Liu X, Xu Y, Wang T, Zeng Z, Zhou Z, and Zhai Y. An adaptive search strategy combination algorithm based on reinforcement learning and neighborhood search. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2025;12(2):177–217. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaf014> EDN: KQGMHL

21. Yang X, Wang J. A novel reinforcement learning algorithm-based control strategy for grid-configured inverters. *Energies*. 2025;18(3):597. <https://doi.org/10.3390/en18030597> EDN: VTWPQY

22. You H, Ye Y, Zhou T, Du J. Force-based robotic imitation learning: A two-phase approach for construction assembly tasks. *arXiv preprint arXiv:2501.14942*. 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.14942>

23. Wu J, Ai X, Xu Z, Zhu Y, Wu Q. Rapid micro-motion feature extraction of multiple space targets based on improved IRT. *Remote Sensing*. 2025;17(3):434. <https://doi.org/10.3390/rs17030434> EDN: HJXDWT

24. Du X, Meng Z, Wang Y, Li Y, Ma Z, He L, Lu W, Chen J, Wu C, Karkee M. Multistage synchronous telescopic manipulator with end-effector — biased rotating-pulling mode for damage-free robotic picking. *Journal of Field Robotics*. 2025;42(5):2297–2317. <https://doi.org/10.1002/rob.22521> EDN: GBNOPC

25. Li C, Xing H, Qin P. Robotic arm trajectory planning based on improved slime mould algorithm. *Machines*. 2025;13(2):79. <https://doi.org/10.3390/machines13020079> EDN: NQSDUP

26. Shen K. Researchch on multi-objective trajectory planning for industrial robots based on machine learning. *Journal of Computer, Signal, and System Research*. 2025;2(1):28–37. <https://doi.org/10.71222/2jcjjz62>

27. Chen T, Cao Y, Xie M, Ni S, Zhai E, Wei Z. Distributed passivity-based control for multiple space manipulators holding flexible beams. *Actuators*. 2025;14:20. <https://doi.org/10.3390/act14010020> EDN: XHGMNS

28. Yao H, Liang L, Ma W, Zhang H, Zhao Y, Cui H. An enhanced continuous contact force model for deployable structures with clearance joints: Validation, simulation, and dynamic characteristics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2025;239(1):19–37.

29. Yin S, Shi Z, Liu Y, Xue G, and You H. Adaptive non-singular terminal sliding mode trajectory tracking control of robotic manipulators based on disturbance observer under unknown time-varying disturbance. *Processes*. 2025;13(1):266. <https://doi.org/10.3390/pr13010266> EDN: ROSATA

30. Calzada-Garcia A, Victores JG, Naranjo-Campos RJ, and Balaguer C. A review on inverse kinematics, control and planning for robotic manipulators with and without obstacles via deep neural networks. *Algorithms*. 2025; 18(1):23. <https://doi.org/10.3390/a18010023> EDN: DBCSCH
31. Gilardi G, Sharf I. Literature survey of contact dynamics modeling. *Mechanism and machine theory*. 2002; 37(10):1213–1239. [https://doi.org/10.1016/S0094-114X\(02\)00045-9](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(02)00045-9)
32. Machado M, Moreira P, Flores P, Lankarani HM. Compliant contact force models in multibody dynamics: Evolution of the hertz contact theory. *Mechanism and machine theory*. 2012;53:99–121, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2012.02.010> EDN: PNFNVH
33. Yu J, Chu J, Li Y, Guan L. An improved compliant contact force model using a piecewise function for impact analysis in multibody dynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part a Journal of Multi-body Dynamics*. 2020;234(2):424–432, 2020. <https://doi.org/10.1177/1464419319900874> EDN: FQCZVT
34. Wang X, Chen Z. Adaptive sliding mode control for dual-arm space robots post-capturing spinning targets. *Advances in Space Research*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.07.050>
35. Liu D, Ai H, Chen L. Impedance control of space robot on-orbit insertion and extraction based on prescribed performance method. *Applied Sciences*. 2022; 12(10):5147. <https://doi.org/10.3390/app12105147> EDN: MWXIWT
36. Fujiki T, Tahara K. Series admittance — impedance controller for more robust and stable extension of force control. *ROBOMECH Journal*. 2022;9(1):23.
37. Zhang Z, Li X, Wang X, Zhou X, An J, Li Y. TDE-based adaptive integral sliding mode control of space manipulator for space-debris active removal. *Aerospace*. 2022;9(2):105. <https://doi.org/10.3390/aerospace9020105> EDN: DLIJXB
38. Ye D, Yang C, Jiang Y, Zhang H. Hybrid impedance and admittance control for optimal robot — environment interaction. *Robotica*. 2024;42(2):510–535. <https://doi.org/10.1017/s0263574723001601> EDN: RGJLAR
39. Formenti A, Bucca G, Shahid AA, Piga D, Roveda L. Improved impedance/admittance switching controller for the interaction with a variable stiffness environment. *Complex Engineering Systems*. 2022;2(3):1–18. <https://doi.org/10.20517/ces.2022.16> EDN: OWKMMZ
40. Xie Z, Sun T, Kwan T, Wu X. Motion control of a space manipulator using fuzzy sliding mode control with reinforcement learning. *Acta Astronautica*. 2020;176: 156–172. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.06.028>
41. Bacher D, Cooper JR, Puig Navarro J. Trajectory generation with load constraints for robotic manipulators. *ASCEND*. 2023. Available from: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230013437/downloads/main.pdf> (accessed: 12.05.2024)
42. MacPherson R, Hockman B, Bylard A, Estrada MA, Cutkosky MR, Pavone M. Trajectory optimization for dynamic grasping in space using adhesive grippers. In *Field and Service Robotics: Results of the 11th International Conference*. Springer Publ.; 2017. P. 49–64. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67361-5_4
43. Dai G, Zhang Q, Xu B. A novel framework for trajectory planning in robotic arm developed by integrating dynamical movement primitives with particle swarm optimization. *Scientific Reports*. 2025;15(1):29656. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14801-7>
44. Zheng L, Yu W, Li G, Qin G, Luo Y. Particle swarm algorithm path-planning method for mobile robots based on artificial potential fields. *Sensors*. 2023;23(13): 6082. <https://doi.org/10.3390/s23136082> EDN: EERPIC
45. Zhang M, Geng X, Bruc J, Caluwaerts K, Ves-pignani M, Sun-Spiral V, Abbeel P, and Levine P. Deep reinforcement learning for tensegrity robot locomotion. In *2017 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*. 2017. P. 634–641.
46. Zhang L. Configuration optimization for free-floating space robot capturing tumbling target. *Aerospace*. 2022;9(2):69. <https://doi.org/10.3390/aerospace9020069> EDN: IRFCJL
47. Zhang L, Wang S. Risk assessment model-guided configuration optimization for free-floating space robot performing contact task. *Machines*. 2022;10(9):720. <https://doi.org/10.3390/machines10090720> EDN: PPIMFI
48. Zhiyuan Z, Xiaohang Y, Yuntao L, Zichun X, Jing-dong Z, Hong L. Singularity analysis and avoidance for an ssrms-type recon-figurible space manipulator with a non-spherical wrist and two lockable passive telescopic links. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2024;37(8):435–459. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.01.014>
49. Wang H, Zhou Z, Zhong X, Chen Q. Singular configuration analysis and singularity avoidance with application in an intelligent robotic manipulator. *Sensors*. 2022;22(3):1239. <https://doi.org/10.3390/s22031239> EDN: RCJGRQ
50. Li C, Zheng Z, Yuan J. A trajectory optimization method with frictional contacts for onorbit capture. *Acta Astronautica*. 2020;175:90–98. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.05.046> EDN: AATBNJ
51. Wang J, Zhang T, Ma N, Li Z, Ma H, Meng F, Meng M Q.-H. A survey of learning-based robot motion planning. *IET Cyber-Systems and Robotics*. 2021;3(4):302–314. <https://doi.org/10.1049/csy2.12020> EDN: FRPVMQ
52. Noroozi F, Daneshmand M, Fiorini P. Conventional, heuristic and learning-based robot motion planning: Reviewing frameworks of current practical significance. *Machines*. 2023;11(7):722. <https://doi.org/10.3390/machines11070722> EDN: GJDEHC
53. Dadiotis I. Optimization and learning-based planning and control for quadrupedal manipulators. *Thesis submitted for the degree of: Doctor of Philosophy (37th cycle)*. University of Genoa, Italy, 2025.

54. Zhang L. Configuration optimization for free-floating space robot capturing tumbling target. *MDPI Aerospace*. 2022;9(2):69–86. <https://doi.org/10.3390/aerospace9020069> EDN: IRFCJL
55. Skrinjar L, Slavić J, Boltežar M. A review of continuous contact-force models in multibody dynamics. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018;145: 171–187. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.07.010> EDN: MEYUJF
56. Hunt KH, Crossley F R E. Coefficient of restitution interpreted as damping in vibroimpact. *Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME*. 1975;42(2): 440–445. <https://doi.org/10.1115/1.3423596>
57. Lankarani HM, Nikravesh PE. A contact force model with hysteresis damping for impact analysis of multibody systems. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*. September 1990;112(3):369–376. <https://doi.org/10.1115/1.2912617>
58. Zhang J, Li W, Zhao L, He G. A continuous contact force model for impact analysis in multibody dynamics. *Mechanism and Machine Theory*. 2020;153:103946. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103946> EDN: TUURRG
59. Tommasino D, Cipriani G, Doria A, Rosati G. Effect of end-effector compliance on collisions in robotic teleoperation. *Applied Science*. 2020;10(24):9077. <https://doi.org/10.3390/app10249077> EDN: TUNTNH
60. Sharkawy A. An investigation on the effective mass of the robot: Dependence on the end-effector position. *Engineering Transactions*. 2021;69(3):293–313. <https://doi.org/10.24423/EngTrans.1329.20210826>
61. Kirschner RJ, Mansfeld N, Gómez Peña G, Abdolshah S, and Haddadin S. Notion on the correct use of the robot effective mass in the safety context and comments on iso/ts 15066. In *2021 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (ISR)*. Munich, Germany, 2021. p. 6–9. <https://doi.org/10.1109/ISR50024.2021.9419495>
62. Chimento J. *Kinematic Calibration of a Seven Revolute Joints Serial Manipulator*. PhD thesis, Politecnico di Torino, 2019. Available from: <http://webthesis.biblio.polito.it/id/eprint/12467> (accessed: 12.05.2024)
63. Doliwa S. Inverse kinematics of the kuka lbr iiwa r800 (7 dof). 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4063575>
64. Zhang L, Guo S, Huang Y, Xiong X. Kinematic singularity analysis and simulation for 7dof kuka lbr iiwa r800 robot. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. 2019;6(1):157–164.
65. Calzolari D, Lampariello R, Giordano AM. Singularity Maps of Space Robots and their Application to Gradient-based Trajectory Planning. In *Proceedings of Robotics: Science and Systems (RSS)*, Corvallis, Oregon, USA, July 12–16, 2020. <https://doi.org/10.15607/RSS.2020.XVI.015>
66. Mueller A. Analytically informed inverse kinematics solution at singularities. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.20409>
67. Beck F, Vu MN, Hartl-Nesic C, A. Kugi A. Singularity avoidance with application to online trajectory optimization for serial manipulators. *IFAC-PapersOnLine*. January 2023;56(2):284–291. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1582>

About the authors

Yeshurun A. Adde, Doctor of Philosophy (Physics), PhD Scholar, School of Mechanical & Industrial Engineering, College of Technology & Built Environment-AAiT, Addis Ababa University, Addis Ababa, Ethiopia; ORCID: 0000-0001-5137-0667; e-mail: kibret10@gmail.com

Yury N. Razoumny, Doctor of Sciences (Techn.), Director of the Academy of Engineering, Head of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 7704-4720, ORCID: 0000-0003-1337-5672; e-mail: yury.razoumny@gmail.com

Araya A. Betelie, Doctor of Philosophy (Mech.), Assistant Professor, School of Mechanical & Industrial Engineering, College of Technology & Built Environment-AAiT, Addis Ababa University, Addis Ababa, Ethiopia; ORCID: 0009-0008-8761-5644; e-mail: arsames2008@gmail.com

Biruk Degefufu, Degefufu, Bachelor of Science (Mech.), MSc Student, School of Mechanical & Industrial Engineering, College of Technology & Built Environment-AAiT, Addis Ababa University, Addis Ababa, Ethiopia; ORCID: 0009-0009-2368-7371; e-mail: birukdegefufu16@gmail.com

Сведения об авторах

Адде Йешурун А., доктор философии (физика), аспирант, Школа машиностроения и промышленной инженерии, Колледж технологий и искусственной среды-ААИТ, Университет Аддис-Абебы, Аддис-Абеба, Эфиопия; ORCID: 0000-0001-5137-0667; e-mail: kibret10@gmail.com

Разумный Юрий Николаевич, доктор технических наук, директор инженерной академии, заведующий кафедрой механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 7704-4720, ORCID: 0000-0003-1337-5672; e-mail: yury.razoumny@gmail.com

Бетели Арайя А., доктор философии (механик), доцент, Школа машиностроения и промышленной инженерии, Колледж технологий и искусственной среды-AAiT, Университет Аддис-Абебы, Аддис-Абеба, Эфиопия; ORCID: 0009-0008-8761-5644; e-mail: arsame2008@gmail.com

Дегефу Бирук, бакалавр технических наук, студент магистратуры, Школа машиностроения и промышленной инженерии, Колледж технологий и искусственной среды-AAiT, Университет Аддис-Абебы, Аддис-Абеба, Эфиопия; ORCID: 0009-0009-2368-7371; e-mail: birukdegefu16@gmail.com



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-4-359-375

EDN: CRNUMH

Research article / Научная статья

Formulation of Satellite-UAVs Integration System for Earth Remote Sensing in the Republic of the Union of Myanmar

Aleksandr V. Starkov^{a,✉}, Mar Lwin Zin^b, Oleg E. Samusenko^c,
Myo Thant Aung^a, Htet Linn Nay^a

^a Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

^b Mandalay Technological University, Mandalay, Myanmar

^c RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉starkov@goldstar.ru

Article history

Received: August 5, 2025

Revised: October 12, 2025

Accepted: October 25, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. The article develops the concept of a Hybrid Earth Remote Sensing System (HERS) for Myanmar, integrating Low-Earth Orbit (LEO) satellites and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to obtain near real-time, high-resolution geospatial data for environmental monitoring and disaster risk management tasks. Analysis of the existing Earth remote sensing infrastructure and implemented projects revealed several limitations: high latency of satellite systems, cloud-cover interference, restricted data availability, and institutional barriers, including weak interagency coordination, a shortage of trained personnel, and insufficient funding. As a result of the study, the HERS architecture is formulated, including integration of satellites and UAVs, the use of multifrequency and laser communication channels, and energy-efficient UAVs with modular payloads (SAR, hyperspectral, and infrared sensors), providing compatible processing and rapid data transmission to the national GIS infrastructure. It is shown that the proposed system improves the spatiotemporal resolution of observations, reduces the impact of cloud cover, lowers operational costs compared with predominantly satellite-based solutions, and expands the range of practical tasks; from monitoring agriculture, forests, and water resources to near real-time response to floods and cyclones. The practical significance of the work lies in the fact that implementation of HERS, together with the development of a national GIS platform and specialist training programs, increases Myanmar's resilience to natural and anthropogenic threats and provides more evidence-based support for decision-making.

Keywords: Remote sensing of the Earth, hybrid remote sensing system, satellite imaging, UAV-based monitoring, agriculture monitoring

Authors' contribution

Starkov A.V. — research concept, selection of literature; *Zin M.L.* — analyzing the received data, writing; *Samusenko O.E.* — summarizing the results obtained, editing the text, visualization; *Thant A.M.* — writing; *Nay H.L.* — writing. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Starkov AV, Zin ML, Samusenko OE, Aung MT, Nay HL. Formulation of satellite-UAVs integration system for Earth remote sensing in the Republic of the Union of Myanmar. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(4):359–375. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-359-375>

© Starkov A.V., Zin M.L., Samusenko O.E., Aung M.T., Nay H.L., 2025



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

Разработка системы интеграции спутников и беспилотных летательных аппаратов для дистанционного зондирования Земли в Республике Союз Мьянма

А.В. Старков^{a,✉}, М.Л. Зин^b, О.Е. Самусенко^c, М.Т. Аунг^a, Х.Л. Най^a

^a Московский авиационный институт, Москва, Российская Федерация

^b Мандалайский технологический университет, Мандалай, Мьянма

^c Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉starkov@goldstar.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 5 августа 2025 г.

Доработана: 12 октября 2025 г.

Принята к публикации: 25 октября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Разработана концепция гибридной системы дистанционного зондирования Земли (ГСДЗЗ) для Мьянмы, интегрирующей низкоорбитальные спутники (LEO) и беспилотные летательные аппараты (БПЛА) для оперативного получения детализированных пространственных данных в задачах мониторинга окружающей среды и управления рисками стихийных бедствий. Анализ существующей инфраструктуры ДЗЗ и реализованных проектов выявил ограничения: высокую латентность спутниковых систем, помехи от облачности, ограниченную доступность данных, а также институциональные барьеры, включая слабую межведомственную координацию, дефицит подготовленных кадров и недостаточное финансирование. В результате исследования сформулирована архитектура ГСДЗЗ, включающая интеграцию спутника и БПЛА, использование многочастотных и лазерных каналов связи и энергоэффективных БПЛА с модульной полезной нагрузкой (SAR, гиперспектральные и инфракрасные сенсоры), обеспечивающих совместимую обработку и оперативную передачу данных в национальную ГИС-инфраструктуру. Показано, что предложенная система повышает пространственно-временное разрешение наблюдений, снижает влияние облачности, уменьшает эксплуатационные затраты по сравнению с преимущественно спутниковыми решениями и расширяет спектр прикладных задач; от мониторинга сельского хозяйства, лесов и водных ресурсов до оперативного реагирования на наводнения и циклоны в режиме, близком к реальному времени. Практическая значимость работы заключается в том, что внедрение ГСДЗЗ совместно с развитием национальной ГИС-платформы и программ подготовки специалистов повышает устойчивость Мьянмы к природным и антропогенным угрозам и обеспечивает более обоснованную поддержку управленческих решений.

Ключевые слова: гибридная система, спутниковые снимки, мониторинг с помощью беспилотных летательных аппаратов, мониторинг сельского хозяйства

Вклад авторов

Старков А.В. — концепция исследования, подбор литературы; Зин М.Л. — анализ полученных данных, написание текста; Самусенко О.Е. — обобщение полученных результатов, редактирование текста, визуализация; Аунг М.Т. — написание текста; Най Х.Л. — написание текста. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования:

Starkov A.V., Zin M.L., Samusenko O.E., Aung M.T., Nay H.L. Formulation of satellite-UAVs integration system for Earth remote sensing in the Republic of the Union of Myanmar // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 4. С. 359–375. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-359-375>

Introduction

Introduction of UAV-Satellite Hybrid Remote Sensing System

Existing satellite-based remote sensing systems often lack real-time data transmission and suffer from high latency and cloud-cover interference. However, UAV-based monitoring, although flexible and precise, struggles with range limitations and energy constraints. The lack of an integrated approach hinders efficient decision making, particularly in disaster response, agriculture monitoring, and climate change adaptation. This study aimed to develop a Hybrid Remote Sensing System (HRSS) that combines the wide-area coverage of Low-Earth Orbit (LEO) satellites with the real-time precision of UAV-based monitoring to create a cost-effective, scalable, and adaptive solution for Myanmar. Traditional remote sensing systems often rely on either LEO satellites or Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) independently. Although satellites provide global coverage and long-term data collection, they have limitations, such as low temporal resolution, high operational costs, and cloud interference. On the other hand, UAVs offer high-resolution, real-time monitoring with operational flexibility, but they are limited in endurance and range. To overcome these challenges, an HRSS integrating LEO satellites and UAVs was proposed for Myanmar's environmental and resource management needs. Remote sensing and Geographic Information Systems (GIS) have become integral tools for environmental monitoring, disaster risk management, and resource planning [1; 2]. This study provides an in-depth analysis of the advancements, applications, and challenges associated with remote sensing technologies in Myanmar. This study explores the historical development of satellite data utilisation, the role of key institutions, ongoing research initiatives, and future perspectives. Particular emphasis is placed on the Myanmar-India Friendship Centre

for Remote Sensing, postgraduate education programs, and collaborative efforts with international agencies. This study highlights the importance of capacity building, technological advancements, and policy integration to optimise the potential of remote sensing for sustainable development.

The proposed HRSS offers a synergistic solution by integrating satellite-based remote sensing with UAV-based aerial surveillance. First, LEO satellites provide wide-area continuous coverage, making them ideal for large-scale environmental and climate monitoring. However, their fixed orbital paths and data-acquisition delays can hinder real-time disaster response. Second, UAVs offer on-demand high-resolution imaging, allowing for detailed local monitoring, rapid deployment, and flexibility in data collection. They can supplement satellite limitations by capturing imagery in critical regions affected by cloud cover, enabling continuous monitoring, regardless of weather conditions. Finally, the combination of these technologies enhances the overall efficiency, ensuring a high temporal resolution from UAVs and extensive spatial coverage from satellites. This hybrid system will provide accurate, real-time, and multispectral data, essential for precision agriculture, forestry management, urban planning, and disaster response.¹

Introduction of the Remote Sensing in Myanmar

The First Myanmar-India Friendship Centre for Remote Sensing and Data Processing was established on 15 February 2001 as a result of a collaborative initiative between the Ministry of Science and Technology (MOST) of Myanmar and the Indian Space Research Organization (ISRO) of India. This centre marked a significant milestone in the advancement of remote sensing technology and its practical applications in Myanmar, laying the foundation for the integration of geospatial technologies into the country's development agenda² [3]. The establishment of the centre was a testa-

¹ Remote Sensing for REDD+MRV for Myanmar Officials. Available from: <https://www.icimod.org/remote-sensing-for-redd-mrv-for-myanmar-officials> (accessed: 14.03.2025); *Learning from the experiences of 13 developing countries. Global Comparative Study on REDD+(GCS REDD+)*.

² Floodlist, UN Report — Floods in Myanmar Had Devastating Impact on Agriculture, 2015. Available from: <https://floodlist.com/asia/un-myanmar-floods-food-security> (accessed: 14.03.2025); *Learning from the experiences of 13 developing countries. Global Comparative Study on REDD+(GCS REDD+)*.

ment to the growing recognition of the importance of remote sensing and GIS in addressing critical challenges in agriculture, urban planning, environmental management, and disaster risk reduction. Since its inception, the centre has played a pivotal role in building local capacity, fostering innovation, and promoting sustainable development through the effective use of space-based technologies.

One of the centre's primary achievements has been the comprehensive training of its staff members in the applications of remote sensing technology. This training, facilitated by Indian scientists and experts, has equipped Myanmar's professionals with the technical skills and knowledge necessary to harness the power of geospatial data. The training programs have covered a wide range of topics, including data acquisition, image processing, spatial analysis, and the integration of remote sensing with GIS for decision-making. In addition to theoretical knowledge, the centre has emphasised hands-on learning through the execution of several mini-projects. These projects have not only enhanced the technical expertise of the participants, but also demonstrated the practical utility of remote sensing in addressing real-world challenges³ [4].

Among the notable projects undertaken by the centre are **Crop Area Estimation and Condition Monitoring** for the Bago Division, which has provided valuable insights into agricultural productivity and resource management; **Coastal Land Use Analysis** in Rakhine State, which has supported sustainable coastal development and conservation efforts; and **Urban Land Use Mapping and Planning** for a section of the Mandalay Region, which has contributed to the efficient management of urban growth and infrastructure development. Other significant projects include **Land Use and Land Cover Mapping** for Myanmar, which has provided a comprehensive overview of the country's land resources; **Forest Type Mapping** in Pyinmana, which has aided in biodiversity conservation and forest management; and **Waste-**

land Development in the Sagging Division, which has promoted the rehabilitation of degraded lands for agricultural and ecological purposes. These projects have not only addressed specific sectoral needs but have also highlighted the versatility and transformative potential of remote sensing technology⁴.

In addition to its project-based initiatives, the centre has successfully implemented a research-oriented program for postgraduate studies affiliated with the United Nations Centre for Space Science and Technology Education in Asia and the Pacific (CSSTEAP). Since its launch in 2002, this program has aimed to enhance the academic and professional capabilities of students in the field of remote sensing and data processing. By offering advanced training and research opportunities, the program has nurtured a new generation of experts who are equipped to tackle complex challenges using geospatial technologies. The program's emphasis on interdisciplinary learning and international collaboration has further enriched its curriculum, enabling students to gain exposure to global best practices and innovative approaches [1; 5].

The establishment and ongoing activities of the First Myanmar-India Friendship Centre for Remote Sensing and Data Processing underscore the importance of international collaboration in advancing scientific research and technological applications for sustainable development. By leveraging the expertise and resources of ISRO and other international partners, the centre has been able to accelerate the adoption of remote sensing and GIS technologies in Myanmar. Its contributions have not only strengthened the country's technical capacity but have also fostered a culture of innovation and knowledge-sharing. As Myanmar continues to face challenges related to climate change, urbanisation, and resource management, the centre's work remains critical in providing data-driven solutions and supporting evidence-based decision-making. Through its commitment to excellence and collaboration, the centre serves as a model for how international partnerships can drive technological progress and sustainable development in the region.

³ Union of Myanmar. Ministry of Forestry. *National Action Programme of Myanmar to Combat Desertification in the context of United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD)*. Yangon: Ministry of Forestry; 2005

⁴ *Learning from the experiences of 13 developing countries. Global Comparative Study on REDD+(GCS REDD+)*.

1. Materials and Methods

1.2. Advanced Professional Certification in Geospatial Technologies and Applications

In 2007–2008, the first Post Graduate Diploma Course on Remote Sensing and GIS was successfully launched, enrolling 13 trainees. This course aimed to enhance the technical expertise and practical skills of the participants in the application of remote sensing and GIS technologies across various fields. The training program covered diverse areas, including **Agriculture and Soil Science, Geoscience Applications, Marine Science Applications, and Urban Planning**⁵ [1].

These projects and courses have contributed significantly to the development of expertise in remote sensing and GIS applications, fostering advancements in environmental monitoring, resource management, and urban development.

In 2007, the Myanmar-India Friendship Centre for Remote Sensing and Data Processing (RSDPC) was reorganised and renamed as the Remote Sensing Department. This department was placed under the auspices of Mandalay Technological University (MTU) and the Ministry of Science and Technology (MOST). This reorganisation marked a new chapter in the department's mission to advance research and education in remote sensing and GIS technologies, further solidifying its role in national and regional development initiatives⁶ [5].

1.2. Historical Applications and Case Studies in Remote Sensing and GIS

The Remote Sensing Department has a rich history of conducting impactful research and projects that leverage remote sensing and GIS technologies. These initiatives have addressed various critical areas including disaster risk management,

environmental studies, and agricultural planning. Key projects and studies include the following.

1. *Disaster Risk Management in Myanmar*: This project focused on utilising remote sensing and GIS to assess and mitigate the risks associated with natural disasters, enhancing the country's preparedness and response strategies.

2. *Groundwater Potential Zone of the Kyaukse Area*: A comprehensive analysis was conducted to identify and map groundwater potential zones in the Kyaukse area to support sustainable water resource management.

3. *Geomorphological Studies on Ayeyarwaddy Deltaic Shelf*: This study involved detailed geomorphological mapping and analysis of the Ayeyarwaddy Deltaic Shelf and contribute to a better understanding of the region's physical landscape and its changes over time.

4. *Crop Pattern Change Analysis of Mandalay Area*: Remote sensing techniques were employed to monitor and analyse changes in crop patterns in the Mandalay area, aiding in agricultural planning and policy-making.

5. *Land Use/Land Cover Change Analysis of Mandalay City*: This project focused on mapping and analysing land use and land cover changes in Mandalay City to provide valuable insights for urban planning and development.

6. *Irrigation Management System for Paddy Field in Mandalay Region*: An advanced irrigation management system was developed using remote sensing and GIS technologies to optimise water use and improve paddy field productivity in the Mandalay Region.

These projects underscore the department's commitment to applying cutting-edge technologies to address real-world challenges, contributing to sustainable development and resource management in Myanmar⁷.

⁵ Reliefweb, Myanmar: Floods — Final Report, 2017. Available from: <https://reliefweb.int/report/myanmar/myanmar-floods-final-report-mdrmm006> (accessed: 14.03.2025); *United Nations Platform for Space-Based Information for Disaster Management and Emergency Response (UN-SPIDER), Flood 2022*, 2022. Available from: <https://www.un-spider.org/flood> (accessed: 14.03.2025).

⁶ *Remote Sensing for REDD+MRV for Myanmar Officials*. Available from: <https://www.icimod.org/remote-sensing-for-redd-mrv-for-myanmar-officials> (accessed: 14.03.2025); Learning from the experiences of 13 developing countries. Global Comparative Study on REDD+(GCS REDD+)

⁷ *Learning from the experiences of 13 developing countries. Global Comparative Study on REDD+(GCS REDD+)*; Reliefweb, Myanmar: Floods — Final Report, 2017. Available from: <https://reliefweb.int/report/myanmar/myanmar-floods-final-report-mdrmm006> (accessed: 14.03.2025); Union of Myanmar. Ministry of Forestry. *National Action Programme of*

1.3. Current Initiatives and Innovations in Remote Sensing and GIS Applications

The Remote Sensing Department is currently engaged in several significant projects and initiatives that highlight the continued application of remote sensing and GIS technologies [1; 6]. These activities span a range of critical areas from environmental monitoring to cultural heritage preservation and urban safety. Key ongoing activities include the following.

1. *Delineation of Outer Limits of Continental Shelf beyond 200 Nautical Miles*: This project involves the precise mapping and delineation of Myanmar's continental shelf extending beyond 200 nautical miles, contributing to the nation's maritime boundary claims and resource management.

2. *Creating Database of Myanmar Ancient Cities to Include in the List of World Cultural Heritage*: Efforts are underway to develop a comprehensive database of Myanmar's ancient cities. This initiative aims to support the inclusion of these sites in the UNESCO World Cultural Heritage List, promoting cultural preservation and tourism.

3. *ASEAN-INDIA Cooperation Project (Extent of Transfer of Alien Invasive Organisms in South/Southeast Asia Region by Shipping)*: This collaborative project focuses on assessing the transfer of alien invasive organisms through shipping activities in the South and Southeast Asia regions. This project aims to mitigate ecological risks and protect biodiversity.

4. *Urban Fire Analysis in Mandalay using Remote Sensing & GIS Techniques*: Remote sensing and GIS technologies are being utilised to analyse and map urban fire risks in Mandalay. This project supports urban planning and emergency response strategies to enhance public safety.

5. *Teaching Remote Sensing and GIS Subjects for Ph.D. Civil Engineering Students*: The department is actively involved in the education and training of Ph.D. students in Civil Engineering,

offering specialised courses in remote sensing and GIS. This initiative aims to build an advanced technical expertise among future researchers and professionals.

These ongoing activities demonstrate the department's commitment to leveraging remote sensing and GIS technologies for diverse applications, thereby contributing to national development, environmental sustainability, and academic advancement.

1.4. Utilization of Space-based Technologies for Disaster Risk Management

The initiative entitled "Utilization of Space-based Technologies for Disaster Risk Management" was organised by the Asian Disaster Reduction Center (ADRC) in collaboration with the Asian Institute of Technology (AIT). This program aimed to enhance regional capabilities in disaster risk management through the application of advanced geospatial technologies. The initiative included a series of training workshops supported by Tokyo University, Japan to build technical expertise and foster knowledge exchange. Two key workshops were conducted as part of this initiative: **Basic Geospatial Technologies Workshop**: Held in February 2011, which provided foundational training in geospatial technologies, equipping participants with essential skills for disaster risk assessment and management. **Advanced Geospatial Technologies Workshop**: Conducted in November 2011, this workshop focused on advanced applications of geospatial technologies, enabling participants to leverage sophisticated tools and methodologies for more effective disaster risk management.

1.5. Collaborative Partnerships

In addition to the training workshops, the project established significant collaboration to further its objectives:

Myanmar to Combat Desertification in the context of United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). Yangon: Ministry of Forestry; 2005. Remote Sensing for REDD+MRV for Myanmar Officials. Available from: <https://www.icimod.org/remote-sensing-for-redd-mrv-for-myanmar-officials> (accessed: 14.03.2025); Floodlist, UN Report — Floods in Myanmar Had Devastating Impact on Agriculture, 2015. Available from: <https://floodlist.com/asia/un-myanmar-floods-food-security> (accessed: 14.03.2025); *United Nations Platform for Space-Based Information for Disaster Management and Emergency Response (UN-SPIDER), Flood 2022*, 2022. Available from: <https://www.un-spider.org/flood> (accessed: 14.03.2025).

■ **China Centre of Resources Satellite Data and Applications (CRESDA):** A partnership was formed with CRESDA to enhance the utilisation of satellite data in disaster risk management.

■ **China Myanmar Satellite Data Sharing Service Platform Program:** Launched in March 2014, which aimed to create a platform for sharing satellite data between China and Myanmar. This initiative sought to improve the application of space-based technologies in disaster risk manage-

ment, fostering regional cooperation and capacity building [5; 7; 8].

These efforts underscore the importance of international collaboration and advanced technological applications for enhancing disaster risk management capabilities. The partnerships and training programs have contributed significantly to building regional expertise and promoting the effective use of geospatial technologies for disaster preparedness and response (Figure 1).



Figure 1. Flood after Cyclone Nargis at 2008 in Myanmar

Source: by Hurricanes & Society*

Available from: <https://www.hurricanescience.org/history/storms/2000s/cyclonenargis/> (accessed: 14.03.2025).

2. Results and Discussion

2.1. Leveraging Remote Sensing Technology for Enhanced Meteorological and Hydrological Services in Myanmar

The Department of Meteorology and Hydrology (DMH) in Myanmar serves as a critical

institution for monitoring and managing meteorological, hydrological, and seismological activities. Over the decades, the DMH has developed a range of services and achieved notable milestones, significantly contributing to both national and international initiatives in environmental monitoring and disaster risk reduction.⁹

⁹ Floodlist, UN Report — Floods in Myanmar Had Devastating Impact on Agriculture, 2015. Available from: <https://floodlist.com/asia/un-myanmar-floods-food-security> (accessed: 14.03.2025). Learning from the experiences of 13 developing countries. Global Comparative Study on REDD+(GCS REDD+)

Establishment of Services

1. *Meteorological Services*: Initiated in 1937, these services provide crucial weather forecasts and climate information, supporting diverse sectors, such as agriculture, aviation, and public safety.

2. *Agro-meteorological Services*: Established in 1970, these services deliver specialised meteorological data and forecasts to aid agricultural planning and management, thereby enhancing crop productivity and food security.

3. *Hydrological Services*: Launched in 1964, these services oversee the monitoring of water resources, including rivers, lakes, and groundwater, thereby facilitating sustainable water management and accurate flood forecasting.

4. *Seismological and Earthquake Activities*: Since their inception in 1961, these activities have involved the systematic observation and analysis of seismic events, improving earthquake preparedness and response strategies.

International Memberships

■ *International Meteorological Organization (IMO)*: The DMH's membership in the IMO underscores its commitment to global meteorological collaboration and exchange of scientific knowledge.

■ *Acid Deposition Monitoring*: Introduced in 2003, this program focuses on tracking acid rain and its environmental consequences, contributing to the understanding of atmospheric pollution.

■ *Acid Deposition Monitoring Network in Asia (EANET)*: Joining in 2006, the DMH has reinforced regional efforts to monitor and mitigate the effects of acid deposition across Asia.

The DMH's core functions encompass the issuance of timely information, forecasts, and warnings, which are disseminated to decision makers, policymakers, various departments, and the public [2; 9]. The primary responsibility of the DMH is the operation of the Early Warning System, which plays a vital role in disaster risk reduction by providing advance notice of potential hazards. Information, Forecasts, and Warnings: The DMH is responsible for issuing accurate and timely meteorological and hydrological information, forecasts, and warnings to support decision

making and public safety. Data Dissemination: Critical data is disseminated to decision makers, policy makers, various departments, and the public to inform and guide actions related to weather, water resources, and disaster preparedness. Early Warning System: Managing the Early Warning System is a primary responsibility of the DMH, particularly in the context of Disaster Risk Reduction (DRR). This system plays a crucial role in mitigating the impacts of natural disasters by providing early alerts and facilitating timely responses [2; 9].

Various satellite data applications are utilised by the Department of Meteorology and Hydrology (DMH). These applications are categorised into warnings, bulletins, forecasts, and news, which are essential for public safety and informed decision making. They include: Warnings: Cyclone Warning, Storm Surge, Warning Flood Warning, Untimely Rainfall Warning, Fog Warning, Heavy Rain Warning, Aviation Weather Warning, Tsunami Warning, Port Warning, Forecasts: Daily Weather/Water Level Forecast, 10 Days Weather/Flood Forecast, Monthly Weather/Flood Forecast, Seasonal Weather/River Flood Forecast, Aviation Weather Forecast, Marine Weather Forecast, Low Flow Water Level Forecast, Special Forecast, Bulletins and News: Rainfall/Temperature Records, Bay Bulletin, Cyclone News, Flood Bulletin, Special Weather Bulletin, Earthquake News [4; 9; 10].

A historical overview of the application of satellite data and remote sensing technologies by the Department of Forest. Aerial photographs were utilized in the 1920s to assess the vegetative cover of the Ayeyarwady Delta Mangroves. Satellite imagery was first introduced to the Forest Department in 1980 under the FAO/UNEP Tropical Resources Assessment Project. This initiative aimed to conduct a comprehensive forest cover assessment across the entire country. In early 1996, the Forest Department established a Remote Sensing and GIS Section. A digital image processing system was installed during this period, facilitated by financial assistance from the "Watershed Management for Three Critical Areas Project" (MYA/93/005) [11–15].

The image details the remote sensing data sources and software utilised for forest cover

assessment and conservation efforts. Here are some Remote Sensing Data Sources: Landsat TM and ETM+: Imagery with a resolution of 30m x 30m was used for previous forest cover assessments of the entire country in 1990, 2000, and 2005. IRS LISS III: Imagery with a resolution of 23.5m was used for the 2010 forest cover assessment of the entire country. High-Resolution Satellite Imageries: Quickbird, IKONOS, ALOS, Rapideye, and Aster were used for specific conservation priority areas, including: Tanimtharyi Nature Reserve, Ayeyarwady Delta, Naypyitaw Region, Rakhine State, Shan State¹⁰ [10].

Several challenges are faced in the implementation and utilisation of Remote Sensing (RS) and GIS technologies. These challenges can be categorised as technical, institutional, and resource-related issues, and there is a pressing need for technical training in RS and GIS for local staff

to enhance their proficiency and operational capabilities. Interconnectivity between ministries and agencies is limited, necessitating stronger partnership activities to foster collaboration. The relationship between government ministries and related departments is weak, which hampers coordinated efforts. Information exchange mechanisms are inadequate, leading to inefficient data sharing and utilisation. Public Awareness and Community Engagement: There is a significant lack of public awareness and local knowledge regarding the benefits and applications of RS and GIS technologies [2]. The capacity of community response and operation is limited, which affects the effective implementation of these technologies at the grassroots level. The absence of a National GIS-based system is a major impediment to the centralised and efficient management of geospatial data (Figure 2).

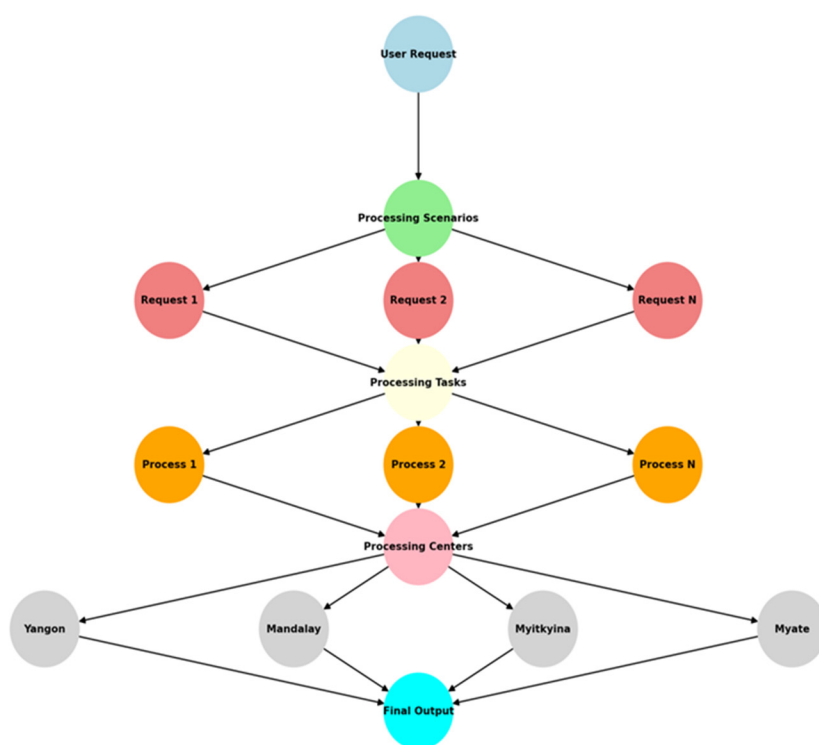


Figure 2. Workflow Efficiency in Application Processing Systems

Source: by A.V. Starkov, O.E. Samusenko, Aung Myo Thant

¹⁰ Remote Sensing for REDD+MRV for Myanmar Officials. Available from: <https://www.icimod.org/remote-sensing-for-redd-mrv-for-myanmar-officials> (accessed: 14.03.2025); *United Nations Platform for Space-Based Information for Disaster Management and Emergency Response (UN-SPIDER), Flood 2022*, 2022. Available from: <https://www.un-spider.org/flood> (accessed: 14.03.2025).

Funding limitations restrict the acquisition of necessary tools, technologies, and training programs. There is a shortage of human resources with the requisite skills and expertise to fully leverage RS and GIS technologies.

GIS has been identified as a crucial tool for providing up-to-date information, enabling timely and appropriate actions in various sectors. There is a need for comprehensive capacity-building programs, including seminars, workshops, and hands-on training, to facilitate the sharing of knowledge and experiences among stakeholders [4; 10]. Access to near-real-time satellite data is essential for effective decision making and response strategies. Technical training should be provided to personnel in related ministries and departments to enhance their proficiency in using GIS and remote sensing technologies. Interdepartmental and interministerial coordination and planning are necessary to ensure cohesive and integrated efforts. Strengthening the collaboration and cooperation of the remote sensing and space-based technology task force through training and project initiatives is vital. Promoting collaborative activities and projects focused on space technology and its applications will help to leverage these technologies for broader societal benefits.¹¹

2.2. Challenges and Future Perspectives

Despite advancements in remote sensing and GIS applications, several challenges remain:

Technical limitations: The need for continuous training and skill enhancement remains a pressing issue.

Data-sharing constraints: Limited interconnectivity between government agencies hampers the effective utilisation of GIS technologies.

Funding and resource constraints: Budget limitations affect the procurement of high-resolution satellite imagery and analytical tools.

Public awareness: There is a need to enhance community engagement and awareness regarding the benefits of remote sensing applications.

Future advancements in remote sensing technologies in Myanmar should focus on the following:

- Strengthening international collaborations for data access and knowledge exchange.

- Implementing real-time satellite monitoring systems for enhanced disaster response.

- Developing a centralised National GIS framework to facilitate integrated resource management.

- Enhancing technical training programs to build a skilled workforce proficient in the latest remote sensing and GIS technologies.

- Encouraging government-private sector partnerships to invest in high-resolution satellite imagery and geospatial infrastructure.

- Expanding public engagement initiatives to raise awareness of the importance of geospatial technologies in daily life and decision-making.

These conclusions emphasise the importance of GIS and remote sensing in informed decision making and highlight the need for capacity building, technical training, and enhanced collaboration to maximise the potential of these technologies in Myanmar. The adoption of remote sensing and GIS technologies in Myanmar has contributed significantly to various sectors, from agriculture and disaster management to cultural heritage preservation. While progress has been made, further investment in capacity building, infrastructure, and policy integration is necessary to maximise the benefits of these technologies. Strengthened collaboration between government institutions, academia, and international agencies will be crucial in ensuring the sustainable development of geospatial technologies in Myanmar. Implementing robust technical training programs, fostering public-private partnerships, and increasing public

¹¹ Reliefweb, Myanmar: Floods — Final Report, 2017. Available from: <https://reliefweb.int/report/myanmar/myanmar-floods-final-report-mdrmm006> (accessed: 14.03.2025); Union of Myanmar. Ministry of Forestry. *National Action Programme of Myanmar to Combat Desertification in the context of United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD)*. Yangon: Ministry of Forestry; 2005; United Nations Platform for Space-Based Information for Disaster Management and Emergency Response (UN-SPIDER), *Flood 2022*, 2022. Available from: <https://www.un-spider.org/flood> (accessed: 14.03.2025).

awareness can significantly enhance the efficiency and effectiveness of remote sensing applications in Myanmar.¹²

2.3. UAV-Satellite Integration for Earth Remote Sensing

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Low Earth Orbit (LEO) satellites have become critical technologies for Earth remote sensing. Their integration provides enhanced spatial and temporal resolution, real-time data collection, and improved environmental monitoring capabilities. This thesis explores the challenges and methodologies associated with UAV-Satellite integration for remote sensing applications. The key areas of focus include optimising data transmission, improving energy efficiency, overcoming environmental constraints, ensuring seamless system integration, and addressing cybersecurity risks. This study aims to establish

a framework for the effective use of UAV-Satellite networks to enhance Earth observation and disaster management. Remote sensing has transformed the monitoring of the Earth's surface, climate, and ecosystems. Traditionally, satellitebased remote sensing has been the primary tool for largescale environmental monitoring. However, satellite imagery often suffers from temporal delays, cloud-cover interference, and limited revisit times. UAVs, owing to their ability to capture high-resolution imagery in real time, offer a complementary solution (Figure 3).

The integration of UAVs with LEO satellites allows for more frequent and precise Earth observation, benefiting various applications, such as disaster response, agriculture, climate change studies, and urban development. This thesis examines the technical aspects of UAV-LEO satellite integration and explores practical solutions to overcome these challenges [16; 17].

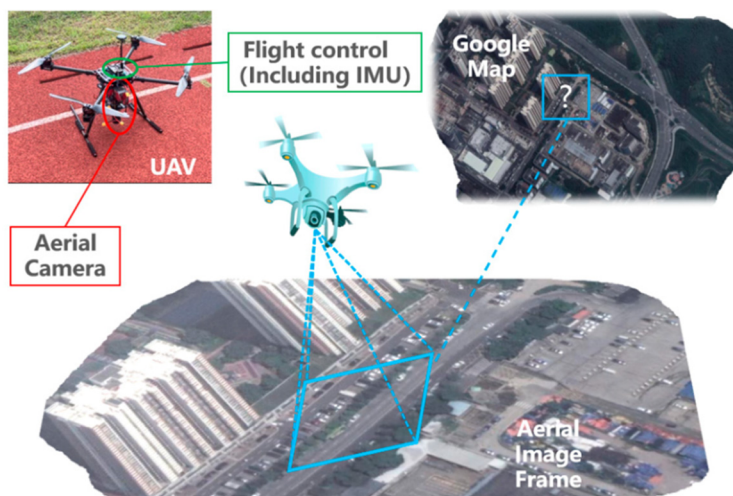


Figure 3. UAVs supports systems for Aerial Image with separated Area

Source: by A.V. Starkov, O.E. Samusenko, Aung Myo Thant

2.4. Advantages of UAV-Satellite Integration

Satellites provide global coverage with periodic updates, but their spatial resolution is limited by altitude and sensor constraints. UAVs offer ultra-

high-resolution imagery at low altitudes, filling the gap in satellite imaging by capturing finer details. By integrating both the platforms, the system can achieve comprehensive coverage with real-time updates in high-priority areas.

¹² Floodlist, UN Report — *Floods in Myanmar Had Devastating Impact on Agriculture*, 2015. Available from: <https://floodlist.com/asia/un-myanmar-floods-food-security> (accessed: 14.03.2025); *Learning from the experiences of 13 developing countries. Global Comparative Study on REDD+(GCS REDD+)*.

UAVs can relay real-time data to satellites, which then transmit information to ground stations for immediate analysis. This capability is essential for time-sensitive applications such as disaster response, where rapid decision-making is required. UAVs equipped with onboard processing units can preprocess data, reducing the burden on satellites and improving data transmission efficiency [16; 18–20].

Optical satellites are affected by cloud cover, which can obstruct imaging capabilities. UAVs equipped with Synthetic Aperture Radar (SAR) can operate under all weather conditions, providing uninterrupted imaging. The fusion of optical satellite imagery with UAV SAR data enhances the accuracy of remote-sensing applications.

Satellites are constrained to fixed orbits, there by limiting their capacity to focus on specific locations at will. UAVs can be deployed in targeted regions by adjusting their flight paths based on real-time events and mission requirements. This flexibility allows for rapid response to emerging environmental changes, natural disasters, and other critical situations (Figure 4). The deployment of LEO satellites requires significant investment, and their revisit frequency may not meet all the operational requirements. UAVs provide a cost-effective solution for continuous monitoring of specific regions, reducing the need for frequent satellite launches. The hybrid approach minimises operational costs while maximising data coverage and frequency.

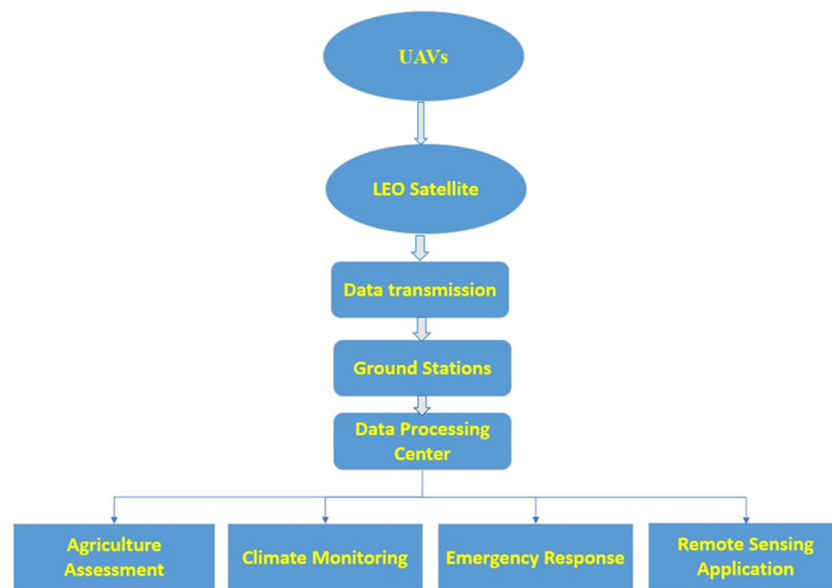


Figure 4. Application of UAV-Satellite Hybrid Systems to Users

Source: by A.V. Starkov, O.E. Samusenko, Aung Myo Thant

UAVs can be deployed rapidly in disaster-affected areas to assess damage, locate survivors, and provide first responders with real-time data. LEO satellites provide a broader overview of affected regions, helping authorities coordinate large-scale emergency response efforts. The combination of UAV and satellite data improves situational awareness and enhances relief operations. LEO satellites carry a variety of sensors, including

optical, infrared, and hyperspectral imaging. UAVs can be equipped with complementary sensors such as LiDAR, thermal imaging, and high-resolution video cameras. This multi-sensor integration enhances the ability to monitor environmental changes, detect anomalies, and improve data accuracy. UAVs can act as relay nodes, ensuring continuous data transmission even in areas with limited satellite connectivity. Secure communication

channels, including quantum encryption and frequency-hopping techniques, enhance data protection. Redundant transmission methods ensure data integrity, preventing losses during critical remote-sensing operations.

2.5. Proposed Methodologies

To optimise data relay efficiency, hybrid data transmission networks leverage laser communication between UAVs and LEO satellites, ensuring high-speed and low-latency connectivity [16; 21]. By implementing multichannel frequency-hopping techniques, these networks minimise the risk of signal interference, enhancing communication reliability in dynamic environments. Additionally, high-speed downlink stations play a crucial role in processing and distributing UAV-LEO data, thereby reducing reliance on terrestrial infrastructure. Starlink's optical inter-satellite communication system significantly decreases the dependency on ground stations, enabling more efficient and direct data transmission across space-based networks.

Energy-Efficient UAV Design. To enhance the endurance and efficiency of remote-sensing missions, **solar-powered UAVs** are being developed, allowing for prolonged operation without frequent recharging. Additionally, integrating **fuel cell technologies** provides a supplementary power source, enabling UAVs to handle high-energy applications, such as advanced sensor payloads and long-range data transmission. Furthermore, the use of **light-weight composite materials** improves aerodynamics, reducing the overall power consumption and increasing flight efficiency. Airbus Zephyr's solar-powered UAV has demonstrated continuous flight beyond **30 days**, showcasing the potential for long-endurance, energy-efficient aerial operations [16; 20–22].

To enhance UAV-based remote sensing capabilities, Synthetic Aperture Radar (SAR) is integrated for cloud-penetrating imaging, enabling data acquisition under all weather conditions. Additionally, hyperspectral and infrared sensors provide advanced environmental monitoring by detecting subtle changes in vegetation, pollution levels, and temperature variations. The develop-

ment of modular UAV payload systems further enhances flexibility, allowing UAVs to be adapted for diverse remote sensing applications from disaster response to agricultural assessment. NASA employs SAR-equipped UAVs to monitor Arctic ice sheets and analyse climate patterns, thereby providing critical insights into environmental changes. Ensuring seamless communication between UAVs and LEO satellites requires the establishment of interoperability protocols that facilitate efficient data exchange. Frequency coordination strategies are implemented to mitigate signal interference, optimising communication stability across multiple channels. Additionally, secure telemetry transmission safeguards data integrity, preventing potential corruption or cyber threats during transmission. The European Space Agency's Sentinel satellite program utilizes standardized data-sharing protocols to streamline Earth observation data integration across multiple platforms [17; 23].

Reducing the financial burden of UAV-Satellite integration involves leveraging CubeSats for low-cost LEO satellite launches, enhancing the affordability of UAV network expansion [18]. The development of modular UAV platforms with replaceable components ensures cost-effective maintenance, extending the operational lifespan while minimising expenses. Furthermore, high-altitude UAVs serve as viable alternatives to expensive geostationary satellites, offering regional monitoring capabilities at a fraction of the cost. SpaceX's cost-effective satellite launch solutions have significantly reduced deployment expenses, making remotesensing missions more accessible and scalable (Figure 5).

As UAV-LEO satellite communication systems have become more advanced, ensuring data security is a critical priority. Quantum encryption is employed to secure communication channels and prevent cyber threats such as eavesdropping and data interception. To enhance resilience against GPS spoofing and jamming attacks, alternative navigation methods, such as Inertial Navigation Systems (INS), are integrated to enable UAVs to operate autonomously without reliance on satellite-based positioning. Additionally, electromagnetic shielding is deployed to protect UAV electronics

from external interference, ensuring stable operation even in environments with high electromagnetic activity. China's quantum communication satellite

system significantly enhances data security for space-based operations, setting a new standard for encrypted satellite-UAV communications (Figure 6).

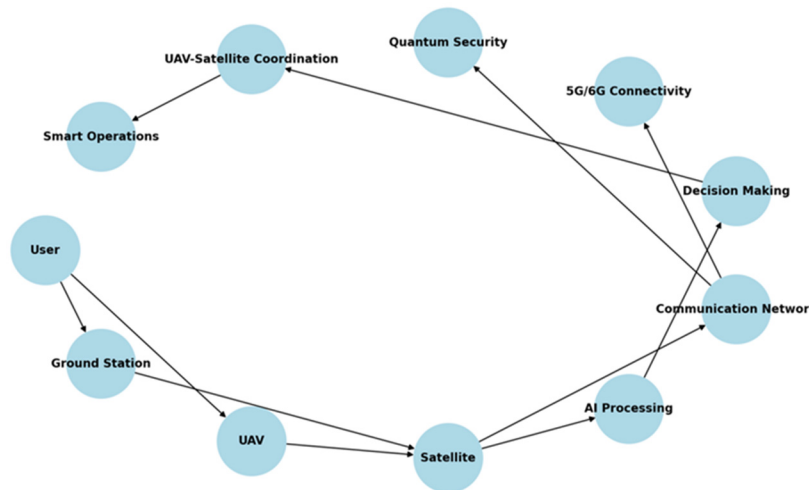


Figure 5. Flow chart UAVs-Satellite integration Cost-Effective Deployment Strategies

Source: by A.V. Starkov, O.E. Samusenko, Aung Myo Thant

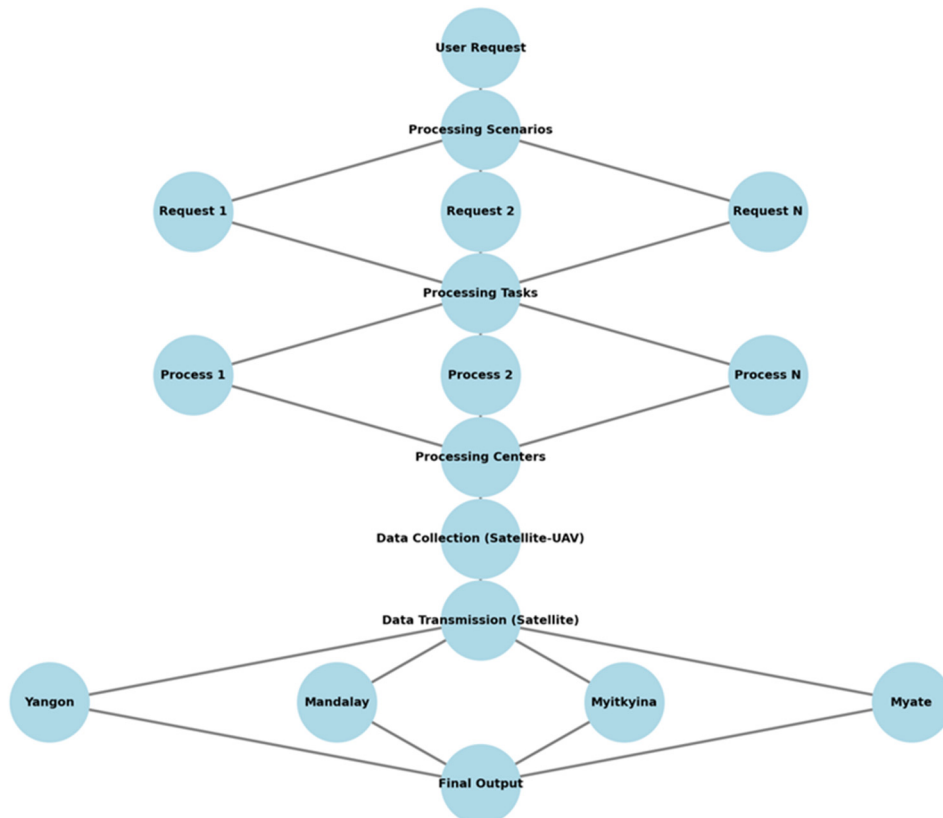


Figure 6. Flow chart UAVs-Satellite integration

Source: by A.V. Starkov, O.E. Samusenko, Aung Myo Thant

The integration of UAVs with satellites presents a promising advancement in Earth remote sensing, offering improved spatial resolution, real-time monitoring, and expanded coverage. Addressing technical challenges such as communication reliability, energy efficiency, environmental adaptability, and cybersecurity will enable sustainable UAV-satellite operations. By leveraging laser communication, solar-powered UAVs, SAR imaging, and standardised networking protocols, this study provides a framework for future UAV-assisted satellite remote sensing missions. Future developments will focus on refining UAV endurance, optimizing power consumption, and expanding UAV applications in climate change monitoring, agricultural assessment, and disaster management¹³ [15; 20; 23; 24]

Conclusion

Satellite-UAV hybrid systems significantly enhance capabilities across various applications owing to their complementary strengths. Satellites excel at covering vast, often remote, regions, providing reliable and consistent large-scale monitoring. By contrast, UAVs, commonly known as drones, specialise in localised operations, capturing high-resolution imagery and precise data close to the ground. When these technologies are integrated, they offer an unmatched combination of wide-area coverage and detailed local insights, creating an ideal solution for comprehensive data gathering. The accuracy and resolution of data were significantly improved in these hybrid systems. While satellites typically offer broad-scale data that might lack fine details, UAVs can provide high-quality, detailed information about targeted areas. Thus, the hybrid approach ensures precise, accurate, and actionable information, which is critical for informed decision making in emergency response scenarios or detailed environmental analyses.

Real-time responsiveness is another vital advantage of Satellite-UAV hybrid systems. Satellites alone often experience latency between revisits to a particular location, potentially causing delays in urgent scenarios. UAVs complement this by swiftly responding to and delivering immediate data when rapid assessments are crucial, such as during natural disasters, humanitarian crises, or security operations. Reliable communication was further strengthened by using the hybrid approach. Satellites maintain robust communication channels that are essential in isolated regions lacking terrestrial infrastructure. Meanwhile, UAVs can act as temporary communication relays, especially valuable in situations where local ground communication networks are damaged or compromised¹⁴.

These hybrid systems are characterised by flexibility and adaptability. Satellites provide consistent, predictable data collection due to their fixed orbital paths, while UAVs can quickly adapt to changing mission requirements, modifying their paths or targets in real time. This dual capability allows the hybrid system to manage evolving scenarios effectively. Cost effectiveness and system resilience are additional key factors. Satellites require significant initial investments, but offer affordable, continuous coverage over long periods. On the other hand, UAVs are cost-effective for rapid deployment and targeted short-term operations. Integrating both allows cost optimisation by leveraging satellite efficiency for long-term monitoring and UAV agility for immediate focused missions. Furthermore, the redundancy provided by both satellites and UAVs increases the overall reliability, ensuring continuous operation even if one component experiences disruption. Finally, the diverse application potential of Satellite-UAV hybrid systems is extensive.

They effectively support disaster management, environmental monitoring, agricultural and forestry

¹³ European Parliament and of the Council of 27 April 2016, Regulation (EU) 2016/679 on the protection of natural persons with regard to the processing of personal data and on the free movement of such data, and repealing Directive 95/46/EC (General Data Protection Regulation). Available from: <http://data.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj>, 2016 (accessed: 14.03.2025).

¹⁴ Union of Myanmar. Ministry of Forestry. National Action Programme of Myanmar to Combat Desertification in the context of United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). Yangon: Ministry of Forestry; 2005. Remote Sensing for REDD+MRV for Myanmar Officials. Available from: <https://www.icimod.org/remote-sensing-for-redd-mrv-for-myanmar-officials> (accessed: 14.03.2025). *United Nations Platform for Space-Based Information for Disaster Management and Emergency Response (UN-SPIDER), Flood 2022*, 2022. Available from: <https://www.un-spider.org/flood> (accessed: 14.03.2025).

management, military and security surveillance, communication reinforcement in remote regions, and precise infrastructure inspection tasks. This breadth of applications demonstrates the significant value and broad appeal of adopting integrated Satellite-UAV solutions [25].

Implementing a **Satellite-UAV hybrid system** is highly advantageous for Myanmar, given the country's geographical diversity, frequent natural disasters, and limited infrastructure in remote regions. Satellites can provide extensive coverage across Myanmar's challenging terrain, enabling the reliable and comprehensive monitoring of environmental conditions, disaster risks, and resource management. Simultaneously, UAVs (drones) offer precise, high-resolution data collection, which is crucial for immediate local responses to disasters, such as cyclones, floods, or earthquakes. The integration of these technologies has the potential to enhance emergency responsiveness, strengthen communication connectivity in isolated regions, and facilitate effective management of agricultural, environmental, and infrastructural developments. This, in turn, is expected to support the nation's resilience and sustainable growth.

References

1. Renner SC, Rappole JH, Leimgruber P, Kelly DS, Shwe NM, Aung T, Aung M. Land cover in the northern forest complex of Myanmar: new insights for conservation. *Oryx*. 2007;41(1):27–37. <https://doi.org/10.1017/S0030605307001603>
2. Mu Q, Zhao M, Running SW. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*. 2011;115(8):1781–1800. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.019>
3. Kurosu T, Fujita M, Chiba K. Monitoring of rice crop growth from space using ERS-1 C-band SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1995; 33:1092–1096. <https://doi.org/10.1109/36.406698>
4. Bryant RL. *The Political Ecology of Forestry in Burma, 1824–1994*. London: University of Hawai'i Press, 1997. ISBN 10 0824819098
5. Saw AA. *Deforestation and Local Livelihood Strategy: A Case of Encroachment into the Wunbaik Reserved Mangrove Forest, Myanmar*. Ph.D. Thesis. Kyoto, Japan: Kyoto University; 2017.
6. Htun NZ, Mizoue N, Kajisa T, Yoshida S. Deforestation and forest degradation as measures of Popa Mountain Park (Myanmar) effectiveness. *Environmental Conservation*. 2009;36(03):218–224. <https://doi.org/10.1017/S0376892909990415>
7. Stibig H-J, Beuchle R. Forest Cover Map of Continental Southeast Asia at 1:4,000,000: Derived from SPOT4-VEGETATION Satellite Images. TREES Publications Series D: Thematic outputs No. 4. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2003.
8. Win S, Myint MM. Mineral potential of Myanmar. *Resource Geology*. 2008;48(3):209–218. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.1998.tb00018.x>
9. Webb EL, Jachowski NRA, Phelps J, Friess DA, Than MM, Ziegler AD. Deforestation in the Ayeyarwady Delta and the conservation implications of an internationally-engaged Myanmar. *Global Environmental Change*. 2014; 24(1):321–333. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.10.007>
10. Tangdamrongsun N, Ditmar PG, Steele-Dunne SC, Gunter BC, Sutanudjaja EH. Assessing total water storage and identifying flood events over Tonlé Sap basin in Cambodia using GRACE and MODIS satellite observations combined with hydrological models. *Remote Sensing of Environment*. 2016;181:162–173. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.030>
11. Alavipanah SK, Matinfar HR, Rafiei Emam A, Khodaei K, Hadji Bagheri R, Yazdan Panah A. Criteria of selecting satellite data for studying land resources. *Desert*. 2010;15:83–102. <https://doi.org/10.22059/jdesert.2011.23005>
12. Belgiu M, Stein A. Spatiotemporal image fusion in remote sensing. *Remote Sensing*. 2019;11:818. <https://doi.org/10.3390/rs11070818>
13. Candido AKA, Filho ACP, Haupenthal MR, da Silva NM, de Sousa Correa J, Ribeiro ML. Water quality and chlorophyll measurement through vegetation indices generated from orbital and suborbital images. *Water Air & Soil Pollution*. 2016;227:224. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2919-7>
14. Padro JC, Munoz FJ, Avila LA, Pesquer L, Pons X. Radiometric correction of Landsat-8 and Sentinel-2A scenes using drone imagery in synergy with field spectroradiometry. *Remote Sensing*. 2018;10:1687. <https://doi.org/10.3390/rs10111687>
15. Stow D, Nichol CJ, Wade T, Assmann JJ, Simpson G, Helfter C. Illumination geometry and flying height influence surface reflectance and NDVI derived from multi-spectral UAS imagery. *Drones*. 2019;3:55. <https://doi.org/10.3390/drones3030055>
16. Chen Y, Feng W, Zheng G. Optimum placement of UAV as relays. *IEEE Communications Letters*. 2018; 22(2):248–251. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2776215>
17. Lin AY, Novo A, Har-Noy S, Ricklin ND, Stamatou K. Combining GeoEye-1 satellite remote sensing, UAV aerial imaging, and geophysical surveys in anomaly detection applied to archaeology. *IEEE Journal of selected Topics Applied Earth Observations and Remote Sensing*.

2011;4:870–876. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2011.2143696>

18. Zeng Y, Zhang R, Lim TJ. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*. 2016;54(5): 36–42. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1602.03602>

19. Müllerova J, Brůna J, Dvorak P, Bartalos T, Vítková M. Does the data resolution/origin matter? Satellite, airborne and UAV imagery to tackle plant invasions. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic, 2016; XLI-B7-903–908. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B7-903-2016>

20. Alvarez-Vanhard E, Houet T, Mony C, Lecoq L, Corpetti T. Can UAVs fill the gap between in situ surveys and satellites for habitat mapping? *Remote Sensing Environment*. 2020;243:111780. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111780>

21. Li X, Feng W, Chen Y, Wang C-X, Ge N. Maritime coverage enhancement using UAVs coordinated with hybrid satellite-terrestrial networks. *IEEE Transactions on Communications*. 2020;68(4):2355–2369. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.02602>

22. Zhao Y, Chen N, Chen J, Hu C. Automatic extraction of yardangs using Landsat 8 and UAV images: A case study in the Qaidam Basin, China. *Aeolian Research*. 2018;33:53–61. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2018.05.002>

23. Liu P, Di L, Du Q, Wang L. Remote sensing big data: theory, methods and applications. *Remote Sensing*. 2018;10:711. <https://doi.org/10.3390/rs10050711>

24. Liu H, Dahlgren RA, Larsen RE, Devine SM, Roche LM, O' Geen AT, Wong AJY, Covello S, Jin Y. Estimating rangeland forage production using remote sensing data from a small unmanned aerial system (sUAS) and PlanetScope satellite. *Remote Sensing*. 2019;11:595. <https://doi.org/10.3390/rs11050595>

About the authors

Alexandr V. Starkov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of System Analysis and Control, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe highway, Moscow, 125993, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 5242-3413; ORCID: 0000-0002-2332-904X; e-mail: starkov@goldstar.ru

Mar Lwin Zin, PhD (Technical Sciences), Professor of the Department of Remote Sensing, Mandalay Technical University, Aung Chan Thar Quarter, Patheingyi Township, Mandalay Division Mandalay, Myanmar; ORCID: 0009-0008-5824-2578; e-mail: drzinmar80@gmail.com

Oleg E. Samusenko, PhD (Technical Sciences), Head of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 6613-5152; ORCID: 0000-0002-8350-9384; e-mail: samusenko@pfur.ru

Aung Myo Thant, PhD (Technical Sciences), Doctoral student of the Department of Systems Analysis and Control, Moscow Aviation Institute (National Research University), Russian Federation, 125993, Moscow, Volokolamskoe shosse, 4; ORCID: 0009-0000-1159-3292; e-mail: aungmyothant4696@gmail.com

Nay Htet Linn, Graduate student of the Department of Systems Analysis and Control, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe highway, Moscow, 125993, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-1082-957X; e-mail: nayhtetlinn3014@gmail.com

Сведения об авторах

Старков Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и управления, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4; eLIBRARY SPIN-код: 5242-3413, ORCID: 0000-0002-2332-904X; e-mail: starkov@goldstar.ru

Зин Мар Лвин, кандидат технических наук, профессор кафедры дистанционного зондирования Земли, Мандалайский технический университет, Квартал Аунг Чан Тар, г. Патеинджи, Мандалайский округ, Мьянма; ORCID: 0009-0008-5824-2578; e-mail: dr.zinmar80@gmail.com

Самусенко Олег Евгеньевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 6613-5152; ORCID: 0000-0002-8350-9384; e-mail: samusenko@pfur.ru

Аунг Мьо Тхант, кандидат технических наук, докторант кафедры системного анализа и управления, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4; ORCID: 0009-0000-1159-3292; e-mail: aungmyothant4696@gmail.com

Най Хтет Линн, аспирант кафедры системного анализа и управления, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4; ORCID: 0009-0009-1082-957X; e-mail: nayhtetlinn3014@gmail.com



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-4-376-387

EDN: CVILLK

Научная статья / Research article

Особенности функционирования и способы радиационной защиты космического аппарата с ядерной энергоустановкой в газопылевой плазменной среде собственной внешней атмосферы

А.Н. Устинов^а, В.Д. Атамасов^{б,✉}

^а ОАО «МЗ «Арсенал», Санкт-Петербург, Российская Федерация

^б Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ vldmatamasov@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 14 апреля 2024 г.

Доработана: 10 июля 2024 г.

Принята к публикации: 12 августа 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Эксплуатация космических аппаратов с ядерными энергетическими установками, функционирующими в условиях воздействия собственной внешней атмосферы, сопряжена с эффектом переноса радиации из околореакторной зоны в зону около приборного отсека. Данное явление получило название «наведенная радиация». Наведенная радиация оказывает негативное воздействие на оборудование в зоне около приборного отсека. Для защиты от наведенной радиации предложено совместно с традиционными методами защиты использовать специальные устройства, обеспечивающие дополнительную радиационную защиту космических аппаратов с ядерными энергетическими установками. К их числу относятся положительно заряженный разделительный экран; газовые сопла для продувки забортного пространства; электронные нейтрализаторы плазмы с термоэмиссионными катодами. Совместное использование традиционных методов и дополнительных устройств защиты для уменьшения негативного воздействия ядерного реактора значительно продлит срок службы космического аппарата.

Ключевые слова: собственная внешняя атмосфера, ядерная энергетическая установка, наведенная радиация

Вклад авторов:

Устинов А.Н. — научное руководство, научное обоснование термофизических процессов в забортной среде КА, написание текста, подготовка графического материала. Атамасов В.Д. — конструкторская проработка устройств рассеяния среды в ОКП, подготовка графического материала. Оба автора ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования:

Устинов А.Н., Атамасов В.Д. Особенности функционирования и способы радиационной защиты космического аппарата с ядерной энергоустановкой в газопылевой плазменной среде собственной внешней атмосферы // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 4. С. 376–387. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-376-387>

© Устинов А.Н., Атамасов В.Д., 2025



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

Functional Features and Radiation Protection Methods for a Spacecraft with a Nuclear Power Plant in the Gas-Dust Plasma Environment of its Own External Atmosphere

Aleksander N. Ustinov^a, Vladimir D. Atamasov^b✉

^a Arsenal Machine Building Plant, Saint-Petersburg, Russian Federation

^b Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg, Russian Federation

✉vldmatamasov@mail.ru

Article history

Received: April 14, 2024

Revised: July 10, 2024

Accepted: August 12, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. The operation of spacecraft with nuclear power plants operating under the influence of their own external atmosphere is associated with the effect of radiation transfer from the near-reactor zone to the area near the instrument compartment. This phenomenon is called “induced radiation”. Induced radiation has a negative effect on the equipment in the area near the instrument compartment. To protect against induced radiation, this article suggests, together with traditional protection methods, using special devices that provide additional radiation protection for spacecraft with nuclear power plants. These include: a positively charged separation screen; gas nozzles for purging the outboard space; electronic plasma neutralizers with thermionic cathodes. The combined use of traditional methods and additional protection devices to reduce the negative impact of a nuclear reactor will significantly extend the service life of the spacecraft.

Keywords: own external atmosphere, nuclear power plant, induced radiation

Authors’ contribution

Ustinov A.N. — scientific guidance, scientific justification of thermophysical processes in the external environment of the spacecraft, text writing, preparation of graphic material. *Atamasov V.D.* — design development of devices for dissipating the environment in the NES, preparation of graphic material. Both authors read and approved the final version of the article.

For citation

Ustinov AN, Atamasov VD. Functional features and radiation protection methods for a spacecraft with a nuclear power plant in the gas-dust plasma environment of its own external atmosphere. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(4):376–387. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-376-387>

Введение

Исследование явления наведенной радиации собственных внешних атмосфер космических аппаратов необходимо при внедрении ядерных систем энергообеспечения в составы перспективных космических аппаратов (КА). Данное явление возникает в результате излучения ядерного реактора, который активирует ядра веществ, входящих в состав забортной газопылевой плазменной среды [1]. После истечения периода полураспада половина возбужденных ядер деактивируется в результате их расщеплений, сопровождаемых излучениями корпускулярных потоков и γ -квантов. Это явление, как правило, осуществляется в процессе

перемещения активированной газоплазменной среды собственной внешней атмосферы в обход блока радиационной защиты теневого типа в область теневой радиационной защиты.

Область плазмы, сформировавшаяся в забортной атмосфере рядом с работающим ядерным реактором на космическом аппарате, содержит большое количество заряженных частиц и имеет высокую температуру. Процессы ионизации атомов и возбуждения ядер атмосферных веществ доминируют в данной области. Деактивация радионуклидов в защищенной от ядерного реактора области приводит к негативным изменениям свойств материалов и поражением электронных устройств, что может привести к деградациям бортовых систем КА,

оснащенных ядерными энергетическими установками. Процесс накопления радиоактивных изотопов в веществах СВА под действием облучения ядерным реактором называется активацией среды [2–5].

Еще раз акцентируем, что процессы рекомбинации и расщепления ядер при их деактивации в области атмосферы, где расположены приборные отсеки, целевые и вспомогательные системы, протекают за счет вторичных электромагнитных и корпускулярных излучений. Образовавшиеся в СВА градиенты концентраций, потенциалов, температуры и давления приводят к интенсивному перемешиванию («бурлению») атмосферной среды и переносу облученных ядерным реактором веществ, перемещающихся снаружи блока теневой радиационной защиты в забортную область КА, окружающую его другую оконечность, где размещены его защищенные отсеки и конструктивные устройства. Излучения, сопровождающие вторичные процессы ядерных превращений в атомах атмосферных веществ, вызывают поражение чувствительной к такому излучению электронной и другой аппаратуры наведенной радиацией СВА [5; 6]. Также они способны вызвать существенное негативное изменение свойств конструкционных материалов, особенно прочностных и жесткостных характеристик выносных упругих элементов. Следует помнить, что данное функциональное поражение КА осуществляется за счет энергии, подводимой от собственного ядерного реактора.

Радиоактивность веществ возникает под действием ионизирующего излучения, такого как потоки нейтронов и гамма-квантов, которые являются наиболее интенсивно излучаемыми активными зонами ядерных реакторов космического базирования. Этот процесс называется активацией СВА первичной радиацией ядерного реактора. Вещества СВА при облучении превращаются в радиоактивные изотопы с различными временами полураспадов, которые излучают вторичную радиацию спустя некоторое (разное для различных веществ) время после прекращения облучения реактором. Особо

опасную радиоактивность вызывает нейтронное облучение, что происходит из-за свойств нейтронов, имеющих достаточно большую энергию (не меньше нескольких МэВ), способную инициировать реакции ядерных превращений. Заряженные частицы и гамма-кванты взаимодействуют с электронными оболочками атомов намного интенсивнее, чем с ядрами атомов, и быстро теряют энергию, теряя и способность к активации ядер. Положительно заряженные частицы, такие как протоны и альфа-частицы, также теряют энергию, упруго рассеиваясь на ядрах [7; 8].

Таким образом, нейтроны обладают наибольшей способностью создавать наведенную радиацию, которая происходит при их поглощении ядрами или выбивании из ядер протонов, нейтронов или кластеров нуклонов, например альфа-частиц. Образование радиоактивных изотопов происходит как на поверхности, так и в толще вещества конструктивных элементов и забортной атмосферы КА. Радиоактивные изотопы распадаются и испускают вторичное излучение, которое называется наведенной радиацией.

1. Основные физические процессы, протекающие в собственной внешней атмосфере, облучаемой ядерным реактором космического аппарата

Установлено, что при расщеплении ядер атомов образуется около 80 различных изотопов, которые делятся примерно 40 способами. Стабильность этих изотопов отличается: некоторые из них полностью стабильны, в то время как другие радиоактивно распадаются с периодами полураспадов в секунды, часы и сутки. Разлагающиеся изотопы могут порождать стабильные и нестабильные дочерние изотопы. Как результат, смесь изотопов быстро становится сложной. Например, при ядерных взрывах в продуктах распада было обнаружено порядка 300 изотопов 36 элементов.

В область конструкции и приборного отсека КА перетекают короткоживущие изотопы, которые быстро испускают энергию распада.

Они сбрасывают часть этой энергии на конструктивные элементы и приборный отсек, другая часть излучается в космическое пространство [9–13]. Долгоживущие изотопы, напротив, испускают энергию в течение длительного времени, что создает менее интенсивное излучение, но с более высоким сроком жизни. Таким образом, продукты распада являются источником высокого уровня радиации, который не снижается в течение времени работы ядерного реактора в условиях атмосферного окружения.

Большинство элементов таблицы Менделеева исследованы на радиационную стойкость, и после их экспонирования на излучениях ядерных реакторов были обнаружены явления искусственной радиоактивности.

На рис. 1–4 представлены схемы структурно-функциональных моделей сложных технических систем, каждая из которых включает космический аппарат с ядерной энергетической установкой и его собственную внешнюю атмосферу. Космический аппарат состоит из ядерного реактора, блока теневой радиационной защиты, системы отодвижения ядерного реактора

от основной конструкции аппарата, которая включает выносные упругие элементы и модули целевых и служебных систем.

На рис. 3, 4 и 5 показаны не только элементы сложной технической системы, но и средства дополнительной функциональной защиты от наведенной радиации, генерируемой веществами газопылевой атмосферы на конструкцию КА, расположенную за блоком теневой радиационной защиты. Для обеспечения дополнительной радиационной защиты используются экран (рис. 3, 5), инжектор электронов (рис. 3, 4 и 5) и газовые сопла (рис. 4, 5). Разделяющий атмосферу элемент, выполняющий функцию экрана, препятствует перетеканию газопылевой среды из околореакторного пространства в область, окружающую остальную конструкцию КА.

Протекающие под действием солнечных и галактических космических излучений процессы ионизации забортной среды атмосферы КА с неработающим ядерным реактором вызывают генерирование электрических зарядов: отрицательного на корпусе конструкции КА и положительного в объеме СВА, как показано на рис. 1.

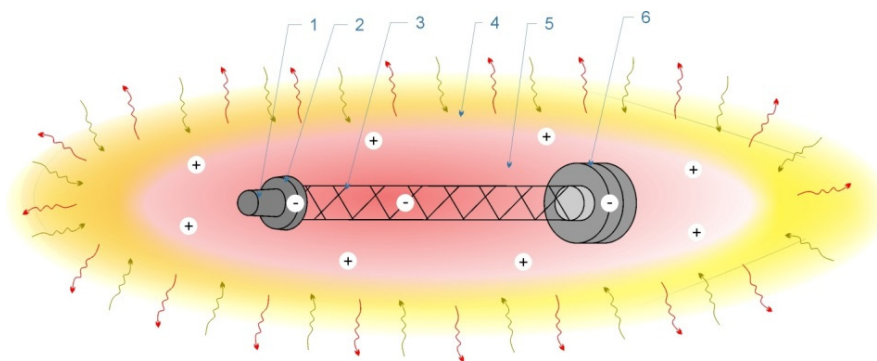


Рис. 1. Схема структурно-функциональной модели КА с выключенным ядерным реактором (в подкритическом состоянии) в условиях воздействия собственной внешней газопылевой атмосферы:
1 — ядерный реактор; 2 — блок теневой радиационной защиты; 3 — система отодвижения ядерного реактора;
4 — поверхностный слой собственной внешней атмосферы; 5 — собственная внешняя атмосфера;
6 — модуль специальных и служебных систем

Источники: выполнено В.Д. Атамасовым

Figure 1. The scheme of the structural and functional model of a spacecraft with a switched-off nuclear reactor (in a subcritical state) under the influence of its own external gas-dust atmosphere:

1 — a nuclear reactor; 2 — a block of shadow radiation protection; 3 — a system for moving away a nuclear reactor;
4 — a surface layer of its own external atmosphere; 5 — its own external atmosphere;
6 — a module of special and service systems

Source: by V.D. Atamasov

Протекающее разделение зарядностей поверхности КА (отрицательной) и объема СВА (положительной), осуществляемое вследствие значительного отличия скоростей перемещения в забортом пространстве легких отрицательных частиц (электронов) по сравнению со скоростями тяжелых (положительно заряженных частиц) ионов, формирует кулоновские силы притяжения, удерживающие атмосферу КА от рассеяния в космическом пространстве. Наружные слои СВА, выделенные на рисунках цветом, воспринимают излучения космоса и подвергаются наиболее интенсивному радиационному воздействию. Поддержание заряженного состояния газопылевой среды и корпуса КА достигается за счет диффузии заряженных частиц из внешних слоев атмосферы в ее внутренние объемы. При этом перемешивание атмосферной среды при неработающем ядерном реакторе происходит в основном в радиальном

направлении. Однако включение ядерного реактора при наличии внешней атмосферы приводит к кардинальному изменению состояния сложной технической системы. На рис. 2 показано, что без дополнительных средств защиты в забортом пространстве возникают потоки не только в радиальном, но и в продольном направлении.

Продольные перемещения образуются в связи с наличием избыточного потенциала среды и значительным увеличением объемного заряда и температуры в области атмосферы около ядерного реактора. Это приводит к переносу активированных излучениями ядерного реактора веществ в теньевую область блока радиационной защиты, и возникновению наведенной радиации на защищенные элементы конструкции космического аппарата. Для предотвращения такого переноса установлен защитный экран (рис. 3).

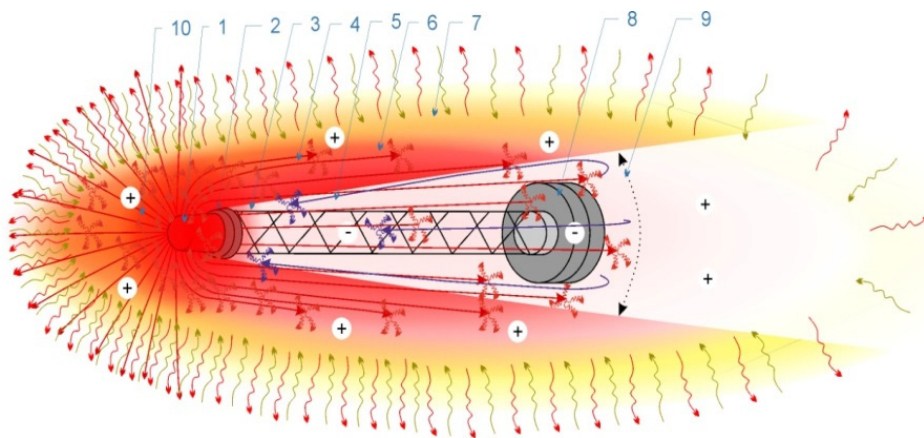


Рис. 2. Схема структурно-функциональной модели КА с активированным ядерным реактором в условиях воздействия собственной внешней газопылевой плазменной атмосферы:

- 1 — ядерный реактор; 2 — блок теньевой радиационной защиты; 3 — система отодвигания ядерного реактора; 4 — продольные потоки МДЧ от ядерного реактора; 5 — продольные потоки мелкодисперсных частиц к ядерному реактору; 6 — собственная внешняя атмосфера аппарата; 7 — поверхностный слой собственной внешней атмосферы; 8 — модули специальных и служебных систем; 9 — телесный угол теньевой радиационной защиты; 10 — область интенсивной активации ядер веществ атмосферы

Источники: выполнено В.Д. Атамасовым

Figure 2. The scheme of the structural and functional model of a spacecraft with an activated nuclear reactor under the influence of its own external gas-dust plasma atmosphere.

- 1 — a nuclear reactor; 2 — a block of shadow radiation protection; 3 — a system for moving a nuclear reactor; 4 — longitudinal fluxes of MDC from a nuclear reactor; 5 — longitudinal fluxes of fine particles to a nuclear reactor; 6 — its own external atmosphere of the apparatus; 7 — the surface layer of its external atmosphere; 8 — modules of special and service systems; 9 — solid angle of shadow radiation protection; 10 — the area of intensive activation of the nuclei of atmospheric substances

Source: by V.D. Atamasov

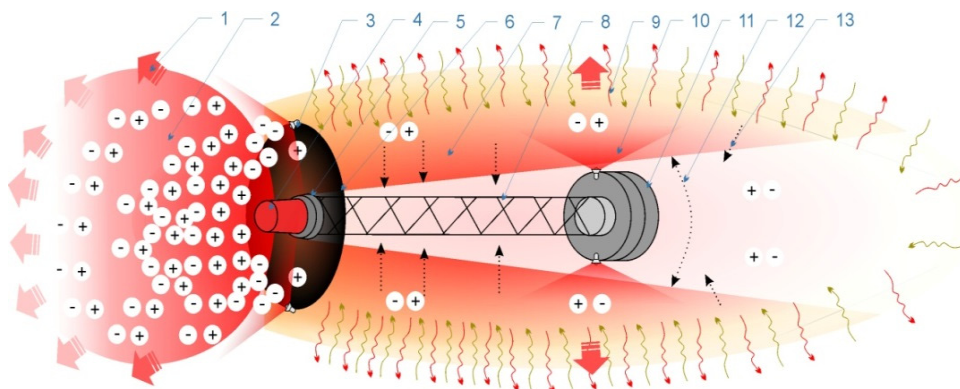


Рис. 3. Схема структурно-функциональной модели КА с активированным ядерным реактором в условиях воздействий собственной внешней газопылевой плазменной атмосферы, разделенной защитным экраном с термоэмиссионными нейтрализаторами плазменной среды:

- 1 — рассеивающийся нейтрализованный газопылевой поток из области интенсивной активации ядер веществ атмосферы; 2 — потоки нейтрализованной плазмы; 3 — электронный нейтрализатор плазмы с термоэмиссионным катодом; 4 — активная зона ядерного реактора; 5 — блок радиационной защиты; 6 — разделительный экран; 7 — собственная внешняя атмосфера КА за блоком радиационной защиты; 8 — система отодвижения ядерного реактора; 9 — поверхностный слой собственной внешней атмосферы; 10 — диаграмма направленности потока электронов из электронного нейтрализатора плазмы (с термоэмиссионным катодом); 11 — модуль специальных и служебных систем; 12 — конус тени блока радиационной защиты; 13 — область наведенной радиации в конус теневого защиты
- И с т о ч н и к: выполнено В.Д. Атамасовым

Figure 3. The scheme of the structural and functional model of a spacecraft with an activated nuclear reactor under the influence of its own external gas-dust plasma atmosphere separated by a shield with thermionic plasma neutralizers:

- 1 — a scattering neutralized gas-dust stream from the area of intense activation of the nuclei of atmospheric substances; 2 — neutralized plasma streams; 3 — an electronic plasma neutralizer with a thermomission cathode; 4 — the active zone of a nuclear reactor; 5 — a radiation protection unit; 6 — a separation screen; 7 — the spacecraft's own external atmosphere behind the radiation protection unit; 8 — the system of separation of a nuclear reactor; 9 — the surface layer of its own external atmosphere; 10 — a diagram of the direction of the electron flow from an electronic plasma neutralizer (with a thermionic cathode); 11 — the module of special and service systems; 12 — the cone of the shadow of the radiation protection unit; 13 — the area of induced radiation in the cone of shadow protection

Source: by V.D. Atamasov

2. Способы защиты от наведенной радиации

Для обеспечения интенсивного рассеивания атмосферы в космическом пространстве используются термоэмиссионные источники электронов. Они нейтрализуют положительный объемный заряд атмосферы и снижают отрицательный заряд поверхности конструкции аппарата, создавая условия для рассеивания атмосферы. Это позволяет устранить электростатические притяжения среды. Для создания электростатического отталкивания активированной атмосферной среды от разделяющего экрана на него наносят положительный потенциал (показано на рис. 3 и 4).

На рис. 4 изображена модель сложной технической системы «КА с ЯЭУ + СВА», которая использует другую систему защиты от наведенной радиации. В данной модели для очистки заборного пространства от радиационно-активной среды предусмотрено пневматическое устройство, с помощью которого осуществляется продувка заборного пространства, чтобы очистить его от газопылевой среды. Для этой операции предлагается использовать сжатый газ, например азот.

Для устранения электростатических сил притяжения, действующих между отрицательно заряженным корпусом КА и положительным объемным зарядом собственной атмосферы, используются термоэмиссионные инжекторы

электронов, установленные в области около ядерного реактора и на корпусе приборно-агрегатного отсека (см. рис. 3). Для компенсации реактивных воздействий истекающего газа на

корпус аппарата пневматическая система имеет газовые сопла, которые обдувают забортное пространство в противоположных направлениях.

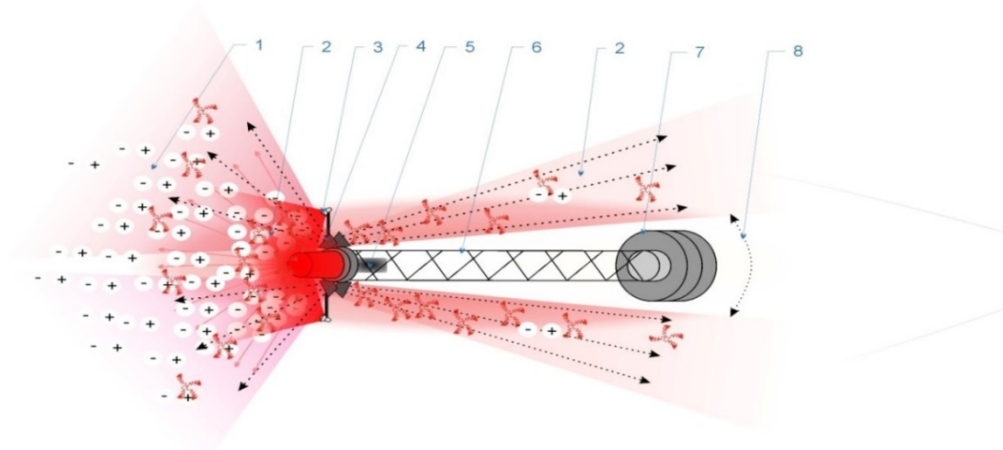


Рис. 4. Схема структурно-функциональной модели КА с активированным ядерным реактором в условиях воздействий собственной внешней газопылевой атмосферы, продуваемой потоками газа с целью очистки забортного пространства от наведенной радиации:

- 1 — собственная внешняя газопылевая атмосфера с активированными излучениями реактора ядрами веществ; 2 — потоки газа очистки забортного пространства от наведенной радиации; 3 — электронный нейтронизатор плазмы с термоэмиссионным катодом; 4 — сопла газового устройства; 5 — баллон сжатого газа очистки; 6 — система отодвижения ядерного реактора; 7 — приборный отсек; 8 — конус тени блока радиационной защиты

Источники: выполнено В.Д. Атамасовым

Figure 4. The scheme of the structural and functional model of a spacecraft with an activated nuclear reactor under the influence of its own external gas-dust atmosphere blown by gas flows in order to clean the outboard space from induced radiation:

- 1 — its own external gas-dust atmosphere with activated radiation of the reactor by the nuclei of substances; 2 — gas streams of purification of the outboard space from induced radiation; 3 — electronic plasma neutralizer with a thermionic cathode; 4 — nozzles of the gas device; 5 — a cylinder of compressed gas purification; 6 — a system for moving the nuclear reactor; 7 — instrument compartment; 8 — cone of the shadow of the radiation protection unit

Source: by V.D. Atamasov

Полученные патенты [14; 15] изобретений касаются средств защиты от наведенной радиации собственной внешней атмосферы при функционировании ядерного реактора системы энергообеспечения КА. Факторы, приводящие к образованию условий для активации ядер веществ атмосферы и переносу активированной среды в обход блока радиационной защиты в область модуля целевых и обеспечивающих бортовых систем конструкции КА, были обоснованы в результате анализа химических и ядерных процессов в СВА КА, имеющего бортовую ядерную энергоустановку.

Структурно-функциональные модели были созданы для представления конструкций КА с ядерными энергоустановками и собственными внешними газопылевыми плазменными атмосферами, а также для протекающих электрохимических и ядерных процессов, которые приводят к появлению наведенных радиаций. Были рассмотрены различные конструктивные схемы защиты космического аппарата от факторов радиационного воздействия бортового ядерного реактора на конструкционные материалы и электронные приборы через наведенную радиацию внешней собственной атмосферы.

3. Универсальный способ защиты от наведенной радиации

Выполним анализ недостатков каждого из предложенных методов, ограничивающих сроки их активных функционирований. Использование автономной системы с продувкой забортного пространства длительное время (7...10 лет) требует наличия большого запаса расходоуемого газа, что делает систему газоснабжения неприемлемо массивной. Система дополнительной радиационной защиты с разделительным экраном, отталкивающей облученную (активированную) радиационными излучениями ядерного реактора атмосферную среду (см. рис. 3), имеет ограничения, связанные с конструктивно допустимым диаметром экрана. В аномальных ситуациях наружный диаметр околореакторной области СВА может превышать диаметр защитного экрана, что приведет к затеканию активированной реактором атмосферы к защищенным отсекам КА и к прекращению его функционирования. С целью устранения указанных недостатков целесообразно объединить запатентованные способы в единую дополнительную к традиционным методам радиационную защиту КА, для управления функционирования которой в защищенную область забортного пространства устанавливается прибор (ионизационная камера), контролирующей интенсивность наведенного радиационного излучения СВА.

На рис. 5 представлена новая схема структурно-функциональной модели сложной технической системы, в состав которой входит космический аппарат с ядерной энергетической установкой и окружающая его «собственная внешняя атмосфера». Как и в предыдущих вариантах (рис. 3 и 4), космический аппарат (рис. 5) состоит из ядерного реактора 5, блока теневой радиационной защиты 6, системы отодвижения ядерного реактора от защищенных частей конструкции аппарата 10, а также универсального комплекса средств дополнительной защиты от наведенной радиации, переносимой веществами газопылевой атмосферы на часть конструкции КА, расположенную в тени конуса блока радиационной защиты 12.

В качестве элементов системы дополнительной радиационной защиты используются следующие устройства: разделительный экран 7, электронные нейтрализаторы плазмы с термоэмиссионными катодами 4 и сопла газовых устройств 3 и 8.

Итак, на рис. 5 представлено знаково-символическое и пространственно-схематическое изображение структурно-функциональной схемы КА с ядерным источником электрической энергии и предлагаемой авторами универсальной системой радиационной безопасности. Предлагаемая система радиационной безопасности включает в свой состав традиционные и дополнительные способы защиты устройств, чувствительных к радиационным излучениям. Показано, что ядерный реактор с энергопреобразующим устройством располагается на оконечности конструкции КА и имеет конструктивную связь с блоком радиационной защиты 6, создающим в радиационном поле ядерного реактора «теневую» область 15, в которой плотность излучения ослаблена до допустимого уровня. Указанная область выделена на рисунке за разделительным экраном в виде усеченного конуса темно-серого цвета.

Естественно, что выполнить блок радиационной защиты, полностью окружающий поверхность реактора-преобразователя, как и отодвинуть реактор на очень большое расстояние, не представляется возможным, ввиду неприемлемо больших массогабаритных характеристик таких систем. Авторами было предложено осуществлять очистку забортного пространства КА от СВА с помощью новой универсальной дополнительной системы радиационной безопасности. Универсальная система включает в свой состав дополнительные средства радиационной безопасности, обеспечивающие очистку забортного пространства от СВА, как используемую в запатентованном методе очистки с разделительным экраном (см. рис. 3), так и разработанную в методе с продувкой забортного пространства газом очистки (см. рис. 4). Совместное использование указанных методов защиты от наведенной радиации способствует значительному повышению надежности и долговечности КА с ЯЭУ.

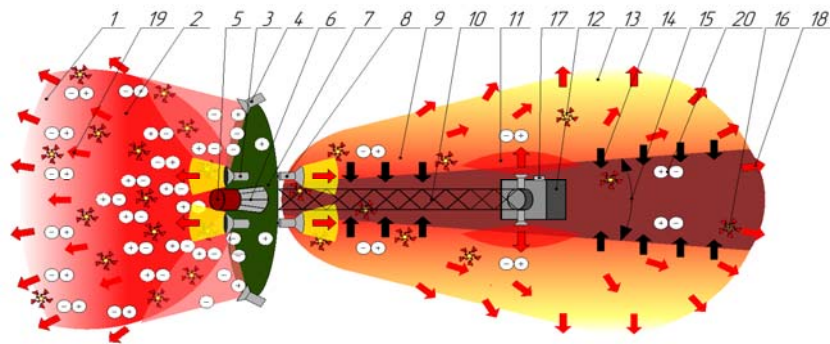


Рис 5. Схема структурно-функциональной модели КА с активированным ядерным реактором с элементами дополнительной радиационной защиты целевых и служебных систем в условиях воздействия плазменной СВА:

- 1 — рассеивающийся нейтрализованный газопылевой поток из области интенсивной активации ядер веществ атмосферы; 2 — нейтрализованная плазменная среда в околореакторном пространстве СВА; 3, 8 — сопла газового устройства; 4 — электронный нейтрализатор плазмы с термоэмиссионным катодом; 5 — активная зона ядерного реактора; 6 — блок радиационной защиты; 7 — положительно заряженный разделительный экран, отталкивающий плазму СВА с положительным пространственным зарядом; 9 — собственная внешняя атмосфера КА за блоком радиационной защиты; 10 — система отодвигения ядерного реактора; 11 — диаграмма направленности потока электронов из электронного нейтрализатора плазмы (с термоэмиссионным катодом); 12 — модуль целевых и служебных систем; 13 — рассеивающийся нейтрализованный газопылевой поток из области СВА за блоком радиационной защиты; 14 — наведенная радиация в область тени блока радиационной защиты; 15 — конус тени блока радиационной защиты; 16 — реакция деактивации (превращения) активированного ядра вещества СВА; 17 — датчик интенсивности наведенной радиации; 18, 19 — направление движения потоков СВА; 20 — нейтрализованная плазменная среда за блоком теневой радиационной защиты
- Источники: выполнено А.Н. Устиновым

Figure 5. The scheme of the structural and functional model of a spacecraft with an activated nuclear reactor with elements of additional radiation protection of target and service systems under the influence of plasma own external atmosphere:

- 1 — a scattering neutralized gas-dust stream from the area of intense activation of the nuclei of atmospheric substances; 2 — a neutralized plasma medium in the near-reactor space of its own external atmosphere; 3, 8 — a gas device; 4 — an electronic plasma neutralizer with a thermionic cathode; 5 — the active zone of a nuclear reactor; 6 — a radiation protection unit; 7 — a positively charged separation screen repelling the plasma of its own external atmosphere with a positive spatial charge; 9 — the spacecraft's own external atmosphere behind the radiation protection unit; 10 — a system for moving away a nuclear reactor; 11 — a directional diagram of the electron flow from an electronic plasma neutralizer (with a thermionic cathode); 12 — a module of target and service systems; 13 — a scattering neutralized gas-dust flow from the area of its own external atmosphere behind the radiation protection unit; 14 — induced radiation into the shadow area of the radiation protection unit; 15 — the cone of the shadow of the radiation protection unit; 16 — the reaction of deactivation (transformation) of the activated core of the substance of its own external atmosphere; 17 — the intensity sensor of induced radiation; 18, 19 — the direction of movement of the flows of its own external atmosphere; 20 — the neutralized plasma environment behind the block of shadow radiation protection

Source: by A.N. Ustinov

Для управления системой очистки предусмотрен датчик интенсивности наведенной радиации 17 — это ионизационная камера, установленная в защищенной области, формирующая сигнал, запускающий газовую систему продувки в случае превышения допустимого уровня наведенной радиации.

Включение ядерного реактора в условиях наличия СВА приводит к формированию турбулентных плазменных потоков, которые направлены относительно продольной оси КА по спиралеобразным (вихревым) траекториям. Напом-

ним, что такие перемещения появляются вследствие разогрева функционирующим ядерным реактором заборной среды, формирования в ней интенсивных процессов ионизации атомов и активации ядер ингредиентов СВА, в свою очередь порождающих выталкивающие градиенты параметров атмосферы из околореакторной области СВА в удаленное от реактора заборное пространство [16–19].

Таким образом, обосновано, что для предотвращения образования наведенной радиации на чувствительные элементы КА следует исполь-

зовать предлагаемую впервые универсальную дополнительную (по отношению к традиционным) систему радиационной безопасности, в состав которой должны быть включены:

- разделительный экран, заряженный отталкивающим положительным потенциалом, ограничивающим движение к области теневой радиационной защиты сильно активированной среды от ядерного реактора;

- термоэмиссионные инжекторы электронов, способствующие ликвидации электростатического притяжения селективно разделяющихся зарядов: отрицательного на корпусе КА, положительного в пространстве забортной среды, удерживающихся друг около друга силами кулоновского притяжения;

- газовая система, осуществляющая периодическую очистку КА с ЯЭУ от радиационно агрессивной СВА с помощью продувки забортного пространства потоками газа очистки посредством противоположно направленных безмоментных сопел. Безмоментные сопла спарены встречно и соосно, что обеспечивает компенсацию реактивного воздействия системы продувки на движение КА по орбите функционирования.

Функционирование универсальной системы радиационной защиты заключается в следующих особенностях:

- после нейтрализации электростатического положительного пространственного заряда среды осуществляется ее рассеяние вакуумом окружающего космического пространства;

- если диаметр области СВА в околореакторном пространстве превышает диаметр разделительного экрана, то сильно активированная среда будет проникать в защищенную область КА. В такой ситуации датчики интенсивностей наведенной радиации, установленные на корпусе приборно-агрегатного отсека, сформируют сигнал на включение другого — более активного метода защиты — подсистемы газовой продувки забортного пространства КА с одновременным включением всех нейтрализаторов плазмы СВА.

Использование указанных устройств дополнительной радиационной безопасности КА

с ЯЭУ позволяет минимизировать их массовые характеристики и значительно повышает эффективность функционирования при экономном (кратковременном) расходовании продувочного газа. Следствием дублирования друг друга указанных подсистем является повышение надежности радиационной защиты КА с ядерной системой энергообеспечения в условиях функционирования в окружении СВА.

Были получены патенты на изобретения, которые позволяют избавиться от радиационных процессов, вызываемых излучением ядерных реакторов.

Заключение

Выполнен физический анализ процессов, протекающих в СВА, при использовании в составе КА ядерной энергетической установки. Отражены ключевые факторы негативного влияния наведенной собственной внешней атмосферой радиации на защищаемую область КА.

1. С помощью плоских структурно-функциональных моделей процессов ядерных превращений в забортных средах КА с ЯЭУ изучено явление наведенной радиации СВА.

2. Разработаны технические средства защиты от наведенной радиации СВА при функционировании ядерном реакторе. Применение этих разработок в конструкциях аппаратов с ядерными энергетическими установками позволяет снизить радиационные нагрузки, возникающие на орбитах функционирования, до величин воздействий излучения, поступающего из окружающего космического пространства. Получены патенты на изобретения указанных устройств.

3. Разработана структурно-функциональная схема КА с ядерной энергетической установкой с универсальным средством защиты от наведенной радиации, имеющим дополнительные устройства, в составе которых используется подсистема с разделительным экраном, отсекающим от СВА область интенсивной ионизации и активации атмосферы, а также подсистема с газовой продувкой забортного пространства.

4. Предложенные методы защиты могут быть использованы в перспективных разработках космических аппаратов с ЯЭУ для повышения их надежности и долговечности.

Список литературы

1. *Атамасов В.Д., Бабук В.А., Ковалев А.П., Устинов А.Н.* и др. Теоретические основы, особенности конструкций и испытаний ядерных энергетических установок космического базирования. Санкт-Петербург : ФГУП «КБ «Арсенал» имени М.В. Фрунзе», Балт. гос. техн. ун-т «Военмех» имени Д.Ф. Устинова, СПб. отделение Академии космонавтики РФ имени К.Э. Циолковского, 2016. 780 с.

2. *Новиков Л.С.* Высокоскоростные соударения в космосе. Москва : УНЦ ДО, 2003. 72 с. ISBN 5-88800-226-7 EDN: QNQZDL

3. *Поletaев Б.И., Романов А.В., Соколов Ю.А., Устинов А.Н.* и др. Ядерные орбитальные комплексы / под ред. В.Д. Атамасова. Санкт-Петербург : ФГУП «КБ «Арсенал» имени М.В. Фрунзе», Балт. гос. техн. ун-т «Военмех» имени Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, отделение Академии космонавтики РФ имени К.Э. Циолковского, 2016. 945 с.

4. *Курчатov И.В.* Избранные труды : в трех томах. Т. 2 : Нейтронная физика / под общей ред. академика А.П. Александрова. Москва : Наука, 1982. 368 с.

5. *Атамасов В.Д., Поletaев Б.И.* Космонавтика XXI века и ядерные термоэмиссионные энергетические установки / под ред. А.П. Ковалева, В.Ф. Фатеева. Санкт-Петербург : «Агенство РДК — принт», 2002. 384 с.

6. Физика космического пространства // Материалы теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в научно-исследовательском институте ядерной физики имени Д.В. Скобельцына. URL: http://sovet.cosmos.ru/sites/default/files/cospar_r6.pdf (дата обращения: 15.06.2023).

7. *Акишин А.И.* Работоспособность космического оборудования при воздействии собственной внешней атмосферы аппарата // Труды VIII Межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (19–20 ноября 2007). Москва : НИИЯФ МГУ, 2007. С. 15–19. URL: http://nuclphys.sinp.msu.ru/school/s07/s07_03.pdf (дата обращения: 15.06.2023).

8. *Хаффнер Дж.* Ядерное излучение в космосе. Москва : Атомиздат, 1971. 320 с.

9. *Крымский Г.Ф., Петухов С.И., Стародубцев С.А.* Исследования теории космической плазмы // Наука и техника в Якутии. 2022. № 1 (42). С. 8–14. <http://doi.org/10.24412/1728-516X-2022-1-8-14> EDN: JXFOVY

10. *Рыжов Ю.А., Бургасов М.П., Кузовкин К.Н., Свиричевский С.Б.* О методах расчета параметров собственной внешней атмосферы летательных аппара-

тов // Аэротермогазодинамика в разреженных потоках. Москва : МАИ, 1988. С. 3–24.

11. *Корсун А.Г., Твердохлебова Е.М., Габдуллин Ф.Ф.* Динамика искусственных плазменных образований в космосе // Модель космоса. Т. II : Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / под ред. проф. Л.С. Новикова. Москва : Книжный дом Университет, 2007. С. 918–945.

12. *Брагинский С.И.* Явления переноса в плазме // Вопросы теории плазмы : сб. науч. статей. Москва : Госатомиздат, 1963.

13. *Надирадзе А.Б., Корсун А.Г., Куриаков М.Ю., Шапошников В.В., Габдуллин Ф.Ф., Твердохлебова Е.М.* Формирование собственной внешней ионосферы космических аппаратов и эффекты ее воздействия // Труды МАИ. 2011. № 43. С. 19. EDN: NEBZGF

14. *Атамасов В.Д., Дементьев И.И., Устинов А.Н.* Ядерная энергетическая установка космического аппарата. Патент на изобретение RU 2677420 C1, 16.01.2019. Заявка № 2017146477 от 27.12.2017. EDN: ZKZPDU

15. *Атамасов В.Д., Дементьев И.И., Устинов А.Н.* Ядерная энергетическая установка космического аппарата. Патент на изобретение RU 2693434 C1, 02.07.2019. Заявка № 2018134891 от 02.10.2018. EDN: RWFLZU

16. *Колбасин И.В.* Основные источники и состав излучений, воздействующих на собственную внешнюю атмосферу космического аппарата с ядерной энергетической установкой // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 2. С. 123–130. <http://doi.org/10.34759/vst-2020-2-123-130> EDN: JGQGJV

17. *Мильковский А.Г., Атамасов В.Д., Колбасин И.В., Устинов А.Н., Калинина А.М.* Новые явления в космическом эксперименте по созданию искусственного солнечного затмения при совместном полете космических кораблей «Аполлон» — «Союз» // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 3. С. 144–151. EDN: YRLZKI

18. Наземные эксперименты и теоретические исследования // Физика космического пространства : материалы теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в научно-исследовательском институте ядерной физики имени Д.В. Скобельцына. URL: http://sovet.cosmos.ru/sites/default/files/cospar_r6.pdf (дата обращения: 12.02.2025).

19. *Мухеев М.А., Мухеева И.М.* Основы теплопередачи. Москва : Энергия. 1977. 343 с. URL: <https://djvu.online/file/ICHeYFXILZRmp> (дата обращения: 12.02.2025).

References

1. Atamasov V.D., Babuk V.A., Kovalev A.P., Ustinov A.N., et al. *Theoretical foundations, features of designs and tests of space-based nuclear power plants*. St. Petersburg : FSUE KB Arsenal named after M.V. Frunze, Baltic State Technical University. D.F. Ustinov Voennmekh Univ., St. Petersburg Branch of the K.E. Tsiolkovsky Academy of Cosmonautics of the Russian Federation, 2016. (In Russ.)

2. Novikov LS. *High-speed collisions in space*. Moscow: UNC DO Publ.; 2003. (In Russ.) ISBN 5-88800-226-7 EDN: QNQZDL
3. Poletaev BI, Romanov AV, Sokolov Yu, Ustinov AN, Milkovsky AG, Atamasov VD, Babuka VA. et al. *Nuclear orbital complexes*. V.D. Atamasov (ed.). St. Petersburg : FSUE “KB Arsenal named after M.V. Frunze”, Baltic State Technical University. D.F. Ustinov Voenmekh Univ., St. Petersburg Branch of the K.E. Tsiolkovsky Academy of Cosmonautics of the Russian Federation; 2016. (In Russ.)
4. Kurchatov I.V. *Selected works in three volumes. Vol. 2. Neutron Physics*. Academician A.P. Alexandrova (ed.). Moscow: Nauka Publ.; 1982. (In Russ.)
5. Atamasov VD, Poletaev BI. *Cosmonautics of the XXI century and nuclear thermal emission power plants*. A.P. Kovalev, V.F. Fateev (eds.). St. Petersburg: RDK — print Agency Publ.; 2002. (In Russ.)
6. Physics of outer space. *Materials of theoretical and experimental research carried out at the D.V. Skobeltsyn Scientific Research Institute of Nuclear Physics*. URL: http://soviet.cosmos.ru/sites/default/files/cospar_r6.pdf (accessed: 06.15.2023).
7. Akishin AI. *The operability of space equipment under the influence of the spacecraft’s own external atmosphere*. D.V. Skobeltsyn Scientific Research Institute of Nuclear Physics. 2007. P. 15–19. (In Russ.) Available from: http://nuclphys.sinp.msu.ru/school/s07/s07_03.pdf (accessed: 15.06.2023).
8. Haffner J. *Nuclear radiation in space*. Moscow: Atomizdat Publ.; 1971. (In Russ.)
9. Krymsky GF, Petukhov SI, Starodubtsev SA. Studies of the theory of cosmic plasma. *Science and technology in Yakutia*. 2022;1(42):8–14. (In Russ.) <http://doi.org/10.24412/1728-516X-2022-1-8-14> EDN: JXFOVY
10. Ryzhov YuA, Burgasov MP, Kuzovkin KN, Svirshchevsky SB. On methods for calculating the parameters of the own external atmosphere of aircraft. *In the collection Aerothermodynamics in rarefied flows*. Moscow: MAI Publ.; 1988. p. 3–24. (In Russ.)
11. Korsun AG, Tverdokhlebova EM, Gabdullin FF. *Dynamics of artificial plasma formations in space. There is a space model in the sat. Vol. II. The impact of the space environment on spacecraft materials and equipment*. L.S. Novikova (ed.). Moscow: University Book House (KDU); 2007. p. 918–945. (In Russ.)
12. Braginsky SI. *Phenomena of transfer in plasma. Questions of plasma theory: collection of scientific articles*. Moscow: Gosatomizdat Publ.; 1963. (In Russ.)
13. Nadiradze AB, Korsun AG, Kurshakov MYu, Shaposhnikov VV, Gabdullin FF, Tverdokhlebova EM. Formation of the spacecraft’s own external ionosphere and its effects. *Proceedings of MAI*. 2011;(43):19. (In Russ.) EDN: NEBZGF
14. Atamasov VD, Dementiev II, Ustinov AN. *Spacecraft nuclear power unit*. Patent 293434, Russian Federation, IPC B64G 1/42 (2006.01), B64G 1/54. EDN: ZKZPDU
15. Atamasov VD, Dementiev II, Ustinov AN. *Nuclear power plant of spacecraft*. Patent 2677420, Russian Federation, IPC B64G 1/42 (2006.01), B64G 1/54. EDN: RWFLZU
16. Kolbasin IV. Main sources and radiation composition affecting eigen external atmosphere of a spacecraft with nuclear power plant. *Aerospace MAI journal*. 2020;27(2):123–130. (In Russ.) <http://doi.org/10.34759/vst-2020-2-123-130> EDN: JGQJIV
17. Milkovsky AG, Atamasov VD, Kolbasin IV, Ustinov AN, Kalinina AM. New phenomena in the space experiment on the creation of an artificial solar eclipse during the joint flight of the Apollo — Soyuz spacecraft. *Aerospace MAI journal*. 2019;26(3):144–151. (In Russ.) EDN: YRLZKI
18. *Ground-based experiments and theoretical studies. Physics of outer space: Materials of theoretical and experimental studies carried out at the D.V. Skobeltsyn Scientific Research Institute of Nuclear Physics*. (In Russ.) Available from: http://soviet.cosmos.ru/sites/default/files/cospar_r6.pdf (accessed: 12.02.2025).
19. Mikheev MA, Mikheeva IM. *Fundamentals of heat transfer*. Moscow: Energiya Publ.; 1977. (In Russ.) Available from: <https://djvu.online/file/ICHeYFXILZRmp> (accessed: 12.02.2025).

Сведения об авторах

Устинов Александр Николаевич, кандидат технических наук, генеральный директор ОАО «МЗ «Арсенал», Российская Федерация, 195009, Санкт-Петербург, ул. Комсомола, д. 1-3; eLIBRARY SPIN-код 8349-1200; e-mail: Ustinov@mzarsenal.com

Атамасов Владимир Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры АЗ «Космические аппараты и двигатели», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская, д. 1; AuthorID: 523620; e-mail: vldmatamasov@mail.ru

About the authors

Aleksander N. Ustinov, Candidate of Technical Sciences, General Director of Arsenal Machine-Building Plant JSC, 1-3 Komsomol St, 195009, Saint Petersburg, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code; 8349-1200; e-mail: Ustinov@mzarsenal.com

Vladimir D. Atamasov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the A3 Department “Spacecraft and Engines”, Baltic State Technical University “VOENMEKH” named after D.F. Ustinov, 1 1-st Krasnoarmeiskaya St, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation; AuthorID: 523620; e-mail: vldmatamasov@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-4-388-398

EDN: CVQUKW

Research article / Научная статья

Aircraft Pitch Control Via Parametric Identification and PID Optimization

Lin Aung San^{ID}

Higher Education Center of the Defence Services Academy, Pyin Oo Lwin, Myanmar

✉ sunlinaung91788@gmail.com

Article history

Received: June 16, 2025

Revised: September 12, 2025

Accepted: September 23, 2025

Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Abstract. A comprehensive methodology for designing an aircraft pitch angle control system is proposed, combining mathematical modeling, aerodynamic parameter identification, and controller optimization. A comparative study was conducted on the accuracy of the Euler and 4th-order Runge-Kutta methods for numerical integration of longitudinal short period motion equations in identification tasks. It was established that the Runge-Kutta method provides higher accuracy for estimating aerodynamic force coefficients, while the Euler method is preferable for moment analysis, defining the criteria for algorithm selection during data generation. Automated tuning of the PID controller in Simulink achieved record dynamic system performance characteristics (without considering the actuator): rise time — 0.0709 s, overshoot — 11.6%, which is 20–30% superior to results from known counterparts. The developed approach demonstrates the possibility of replacing labor-intensive flight tests with digital models while maintaining accuracy, thereby reducing design time. The results confirm that the integration of numerical modeling, parametric identification, and optimization forms a new standard for preliminary studies in aviation technology, aligning with the digitalization trends in the aerospace industry.

Keywords: approximate modeling, accuracy of estimates, estimates of coefficients, Euler method, Runge — Kutta method, control system synthesis, auto-tuning

Acknowledgement

The author expresses their deep appreciation to their teammates for passionate contributions that ensure the completion of this research work.

For citation

San Lin Aung. Aircraft pitch control via parametric identification and PID optimization. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(4):388–398. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-388-398>



Управление самолетом по тангажу с помощью параметрической идентификации и ПИД-оптимизации

Лин Аунг Сан 

Центр высшего образования Академии вооруженных сил, Пьин Оо Лвин, Мьянма

✉ sunlinaung91788@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 16 июня 2025

Доработана: 12 сентября 2025 г.

Принята к публикации: 23 сентября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Предложена комплексная методология проектирования системы управления углом тангажа самолета, сочетающая математическое моделирование, идентификацию аэродинамических параметров и оптимизацию регуляторов. Проведено сравнительное исследование точности методов Эйлера и Рунге — Кутты 4-го порядка при численном интегрировании уравнений короткопериодического движения для задач идентификации. Установлено, что метод Рунге — Кутты обеспечивает повышенную точность оценки аэродинамических коэффициентов силы, а метод Эйлера предпочтителен для анализа моментов, что определяет критерии выбора алгоритмов при генерации данных. Автоматизированная настройка ПИД-регулятора в Simulink позволила достичь рекордных динамических характеристик системы без учета рулевого привода: время нарастания — 0,0709 с, перерегулирование — 11,6 %, что на 20–30 % превосходит результаты известных аналогов. Разработанный подход демонстрирует возможность замены трудоемких натурных экспериментов цифровыми моделями с сохранением точности, сокращая сроки проектирования. Результаты подтверждают, что интеграция численного моделирования, параметрической идентификации и оптимизации формирует новый стандарт для предварительных исследований в сфере авиационной техники, соответствующий тенденциям цифровизации аэрокосмической отрасли.

Ключевые слова: приближенное моделирование, точность оценок, оценки коэффициентов, метод Эйлера, метод Рунге — Кутты, синтез системы управления, автонастройка

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность своим коллегам по команде за посильный вклад, обеспечивший завершение исследовательской работы.

Для цитирования

San Lin Aung. Aircraft pitch control via parametric identification and PID optimization // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 4. С. 388–398. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-388-398>

Introduction

Contemporary aviation technology demands enhanced safety, stability, and controllability [1]. The precise characterization of aircraft short-period motion, defined by the coupled dynamics of the angle of attack, pitch rate, and normal load factor, is fundamental to achieving these objectives [2; 3]. Accurate modeling of aerodynamic phenomena, including the transitional states of complex con-

figurations, is essential [3]. Traditional analytical methods have limitations when addressing nonlinear dynamics and stochastic disturbances [4]. Consequently, numerical integration techniques critically influence simulation fidelity and computational efficiency [4; 5]. Euler's method offers advantages for real-time applications in onboard flight control computers [6], whereas Runge — Kutta methods enable higher-fidelity aircraft motion modeling [7].

The relevance of this study is the need to improve the accuracy of short-period motion models, particularly under nonlinear dynamics and stochastic disturbances. Traditional analytical modeling methods described in studies on flight dynamics are often limited to simple cases, whereas modern computational approaches, such as Runge — Kutta and Euler methods, allow solving complex problems with controlled error. The reliable estimation of aerodynamic parameters from flight data underpins effective system identification [8; 9]. Parametric identification methods, including the least-squares method (LSM) and neural network algorithms, remain key tools for minimizing errors in estimating aerodynamic coefficients. Experimental data processing methods, such as noise filtering and error estimation, also play an important role, which is particularly important for complex aerodynamic systems. The estimated coefficients enable a robust flight control design in which PID controllers are universally employed for aircraft attitude regulation¹ [10–12]. Computational aero-dynamic modeling provides the foundation for flight dynamics simulation [13], although validation against experimental data remains imperative [14]. PID synthesis leverages transfer function fitting [5], optimization techniques [10], and specialized approaches for nonlinear systems [13]. Adaptive control strategies [14; 15] and delay-compensation methods [16] address practical implementation constraints, whereas rotor dynamics simulations [17] and director algorithms for landing [18] further demonstrate the dependency on precise models. PID tuning methodologies [19] complete this essential framework.

The scientific novelty of this work consists of the integration of Runge — Kutta methods of the 4th order and adaptive LSM for joint modeling of aircraft dynamics and parameter identification in conditions of nonlinear disturbances, the development of an algorithm for automatic adjustment of the PID controller, taking into account the relationship between aerodynamic coefficients and

transient characteristics of the system, and the creation of a universal methodology for parametric studies in MATLAB/Simulink. This study systematically evaluates how numerical integration errors propagate into aerodynamic coefficient estimation and subsequently affect PID controller performance. This analysis provides critical insights into aviation systems that require balanced computational efficiency and control fidelity.

1. Problem Statement

In aircraft dynamics, the short-period mode of the aircraft motion refers to pitch motion in which the aircraft rotates around its lateral axis. This motion includes changes in the pitch angle, pitch rate, and airspeed. In this short-period mode, the aircraft experiences rapid pitch angle fluctuations owing to interference, such as turbulence or pilot actions. The stability and controllability characteristics of the aircraft in this mode are crucial for flight safety and efficiency.

The aim of this study is to develop an integrated approach to model the short-period motion of aircraft, combining numerical methods for solving differential equations (Euler and Runge — Kutta methods), algorithms for parametric identification, and optimization of control systems based on PID controllers. This study solves the following tasks: comparative analysis of the accuracy of the Euler and Runge — Kutta methods, identification of aerodynamic coefficients using LSM, and Repetition. Revision required synthesis and automatic adjustment of the PID controller in the Simulink environment to improve the stability of the pitch control system. Presents an integrated methodology comprising: Dynamics simulation of short-period motion using Euler and Runge — Kutta methods, Aerodynamic parameter identification, and Automatic PID controller tuning for pitch control. The methodological basis of the study includes a three-stage approach: dynamics modeling using Euler and Runge — Kutta methods to solve a system of nonlinear differential equations, para-

¹ Kryuchkov AN, Ermilov MA, Vidyaskina AN. *Synthesis of PID controller using frequency response: Guidelines*. Samara: Samara University Publ.; 2021. (In Russ.)

meter identification using LSM based on experimental data, as well as control optimization through automatic adjustment of the PID controller.

2. Modeling of Aircraft Short Period Motion

This study employed numerical modeling to simulate the aircraft's short-period longitudinal motion, specifically capturing the coupled dynamics of the angle of attack (AoA), pitch rate, and normal load factor. This approach minimizes the costs and risks associated with traditional methods that rely on wind tunnel experiments or flight tests.

Elevator deflection served as the input excitation, while the outputs such as AoA, pitch rate, and normal load factor were selected as standard parameters defining the short-period mode for longitudinal dynamics analysis.

The governing system of nonlinear differential equations was solved using two numerical integration techniques: the explicit Euler method and the 4th-order Runge-Kutta (RK4) method. The choice of the numerical method critically influences the solution stability and local error magnitude, particularly under nonlinear aerodynamic conditions, as established in prior research.

2.1. Euler Method

This is the most elementary numerical method for solving systems of ordinary differential equations (ODEs). It was first described by Leonhard Euler in 1768 in his work "Institutiones Calculi Integralis". The Euler method is an explicit single-step first-order accuracy scheme. It approximates the solution curve with a piecewise linear function termed the Euler polygon.

Moreover, it represents the simplest numerical technique for solving first-order ODEs. This method is employed for the approximate solution of the initial value problems (Cauchy problems) and determines the values of a function defined by a differential equation on a specified point grid.

The Euler method approximates the solution at each step using local linearization. At each iteration, a new function value y_{n+1} is computed

based on the current value y_n and its derivative. The integration step is denoted as h . At every step, the x -value increments by h , whereas the y -value is updated according to the following formula:

$$y_{n+1} = y_n + hf(x_n, y_n), \quad (1)$$

where y_n is the current function value; y_{n+1} is the next function value; $f(x_n, y_n)$ is the derivative at a point (x_n, y_n) ; h is the integration step.

The process is repeated for each step until the endpoint of the integration interval is reached.

2.2. Runge-Kutta Method

The Runge — Kutta method represents one of the numerical techniques used for solving ordinary differential equations (ODEs). The most widely adopted variant is the fourth-order Runge — Kutta method (RK4), which delivers a high accuracy and is extensively utilized in practice.

The RK4 method employs four intermediate points to compute the slope (derivative) at each integration step. This approach enables a significantly more accurate solution approximation compared to the Euler method. The integration step is denoted as h . At each iteration, the x -value increments by h , whereas the y -value is updated as follows:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(k_1, 2k_2, 2k_3, 3k_4), \quad (2)$$

where k_1, k_2, k_3, k_4 are intermediate coefficients calculated at each step.

The intermediate coefficients are calculated as follows:

$$\begin{aligned} k_1 &= f(x_n, y_n); \\ k_2 &= f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_1\right); \\ k_3 &= f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_2\right); \\ k_4 &= f(x_n + h, y_n + hk_3). \end{aligned} \quad (3)$$

The new value y_{n+1} is calculated as a weighted sum of these coefficients.

2.3. Modeling the Dynamics of the Angular Motion of an Aircraft as a Control Object

The presented system of ordinary differential equations describes the dynamics of the angular motion of the aircraft in the longitudinal channel, considering it as an object of control.

$$\begin{aligned}
 \Delta \dot{v} &= \bar{X}^v \Delta v + \bar{X}^a \Delta \alpha + \bar{X}^{\dot{\theta}} \Delta \dot{\theta} + \bar{X}^{\delta_B} \Delta \delta_B + \bar{X}^p \Delta p_{ctrl}; \\
 \Delta \dot{\alpha} &= \Delta \omega_z - \bar{Y}^v \Delta v - \bar{Y}^a \Delta \alpha - \bar{Y}^{\delta_B} \Delta \delta_B - \bar{Y}^p \Delta p_{ynp} + \\
 &\quad + \frac{g}{v_0} \sin \theta \Delta \theta; \\
 \Delta \dot{\omega}_z &= \bar{M}_z^a \Delta \alpha + \bar{M}_z^{\omega_z} \Delta \omega_z + \bar{M}_z^{\dot{\alpha}} \Delta \dot{\alpha} + \bar{M}_z^v \Delta v + \\
 &\quad + \bar{M}_z^{\delta_B} \Delta \delta_B + \bar{M}_z^p \Delta p_{ctrl}; \\
 \Delta \dot{\vartheta} &= \Delta \omega_z; \\
 \Delta \dot{H} &= \frac{v_0}{57.3} \Delta \dot{\theta}; \quad \Delta \theta = \Delta \vartheta - \Delta \alpha; \\
 \Delta \dot{\theta} &= \omega_z - \Delta \dot{\alpha}; \\
 \Delta n_y &= \frac{v_0}{57.3g} \Delta \dot{\theta} = \frac{v_0}{57.3g} (\omega_z - \Delta \dot{\alpha}). \quad (4)
 \end{aligned}$$

In short-period motion, the change in the airspeed of the aircraft can be negligible, and in this flight mode, $\Delta v = 0$, $p_{ctrl} = 0$ and $\theta_0 = 0$. Then, the mathematical model of the aircraft can be described as follows:

$$\begin{aligned}
 \Delta \dot{\alpha} &= \Delta \omega_z - \bar{Y}^a \Delta \alpha - \bar{Y}^{\delta_B} \Delta \delta_B; \\
 \Delta \dot{\omega}_z &= \bar{M}_z^a \Delta \alpha + \bar{M}_z^{\omega_z} \Delta \omega_z + \bar{M}_z^{\dot{\alpha}} \Delta \dot{\alpha} + \bar{M}_z^{\delta_B} \Delta \delta_B; \\
 \Delta \dot{\vartheta} &= \Delta \omega_z; \quad \Delta \theta = \Delta \vartheta - \Delta \alpha; \quad \Delta \dot{\theta} = \Delta \omega_z - \Delta \dot{\alpha}. \quad (5)
 \end{aligned}$$

Simulations in the presence of a stepwise input signal of the angle of attack and pitch rate were performed using the Euler method and the fourth-order Runge — Kutta method. The processing time was 10s, in increments of 0.01. The simulation results of the short-period motion of the aircraft in the longitudinal channel are shown in Figures 1, 2, and 3.

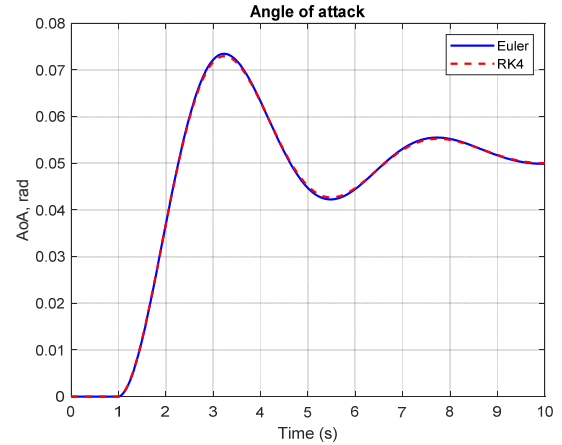


Figure 1. Angle of attack
Source: by San Lin Aung in MATLAB

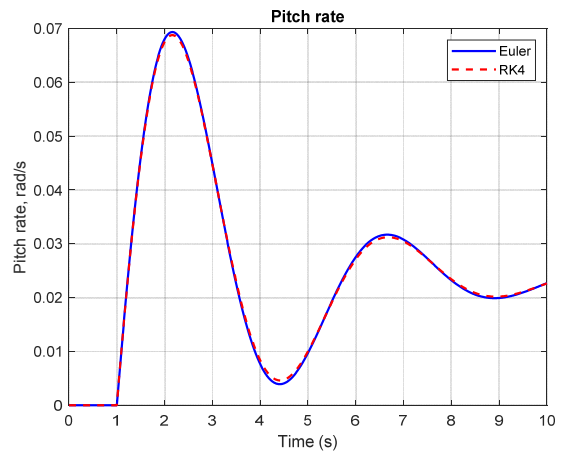


Figure 2. Pitch rate
Source: by San Lin Aung in MATLAB

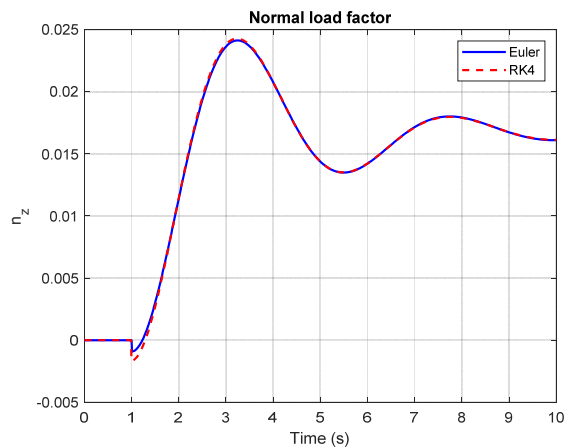


Figure 3. Normal load factor
Source: by San Lin Aung in MATLAB

A key feature of this approach is the utilization of simulated data instead of experimental data for the subsequent parametric identification. This enables the estimation of aerodynamic coefficients via the Least Squares Method (LSM) under controlled conditions, eliminating the influence of external noise and measurement inaccuracies.

The simulation results demonstrate that the Runge — Kutta method yields a reduced discretization error compared to the Euler method, which is critical for identifying high-frequency flight regimes. The accuracy of the numerical method is crucial for analyzing short-duration dynamic modes. The obtained data provides a foundation for developing digital twins of aerodynamic systems corresponding to trends in aviation engineering digitalization.

Thus, combining Euler and Runge — Kutta methods in simulation frameworks not only reproduces short-period motion, but also evaluates the applicability boundaries of each method for specific problem classes. This contributes to the advancement of aviation system design methodologies.

3. Identification of Aerodynamic Coefficients Based on Numerically Simulated Data

The identification of aerodynamic parameters constitutes a critical stage in the design and analysis of aircraft, as the accuracy of determining these parameters directly impacts the effectiveness and reliability of control systems. The obtained coefficient estimates were utilized for developing and tuning automatic control systems that ensure aircraft motion stabilization and control. Consequently, the accurate determination of aerodynamic characteristics plays a pivotal role in creating safe and high-performance control systems capable of adapting to various flight regimes and external conditions.

3.1. Estimation of Aerodynamic Coefficients Using the Least Squares Method

To estimate the aerodynamic coefficients, the traditional least-squares method was used in this work. The least-squares method is undeniably more

effective for linear systems. The mathematical model of an object can be described as:

$$y_{(t)} = \hat{a}^T x_{(t)}, \quad (6)$$

where $y(t)$ is the output vector; $x(t)$ is the vector of regressors or state vector; $\hat{a}$ is the vector of unknown parameters to be estimated.

In this case, $Y = [y_1, y_2, y_3 \dots y_N]^T$ is of $N \times 1$ dimension and X is of $N \times 1$ dimension:

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{1t(1)} & x_{2t(1)} & x_{3t(1)} \\ 1 & x_{1t(2)} & x_{2t(2)} & x_{3t(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1t(N)} & x_{2t(N)} & x_{3t(N)} \end{pmatrix}.$$

Unlike maximum likelihood, when using the least squares method, the parameters to be estimated must occur in expressions for the average values of observations. When the parameters are displayed linearly in these expressions, the least-squares estimation problem can be solved in a closed form, and it is relatively simple to obtain statistical properties for the resulting parameter estimates. The least-squares method is described as:

$$\hat{a} = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (7)$$

where $\hat{a}$ — the vector of unknown parameters to be estimated; X — the object model matrix; Y — the output vector.

3.2. Estimation of Aerodynamic Coefficients Based on Numerically Simulated Data

This study presents the estimation of two force coefficients and four moment coefficients associated with the angle of attack, pitch rate, and normal load factor. To estimate the two force coefficients, the normal load factor is required to form the output signal vector. The object model matrix incorporates angle of attack and elevator deflection.

To estimate the four moment coefficients, a derivative of the pitch rate is required to form the

output signal vector. The object model matrix incorporates the angle of attack, pitch rate, derivative of the angle of attack, and the elevator deflection.

Thus, the object model matrices, output signal vectors, and unknown parameter vectors take the following form:

For the estimation of two force coefficients $\bar{Y}^\alpha$ and $\bar{Y}^{\delta_B}$

$$X = \begin{pmatrix} \alpha_{t(1)} & \delta_{t(1)} \\ \alpha_{t(2)} & \delta_{t(2)} \\ \vdots & \vdots \\ \alpha_{t(N)} & \delta_{t(N)} \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} n_{y(1)} \\ n_{y(2)} \\ \vdots \\ n_{y(N)} \end{pmatrix}, \quad \hat{a} = [\bar{Y}^\alpha \bar{Y}^{\delta_B}]^T.$$

For the estimation of four moment coefficients $\bar{M}_z^\alpha, \bar{M}_z^{\omega_z}, \bar{M}_z^{\dot{\alpha}}$ and $\bar{M}_z^\delta$.

$$X = \begin{pmatrix} 1 & \alpha_{t(1)} & \omega_{z(t(1))} & \dot{\alpha}_{t(1)} & \delta_{t(1)} \\ 1 & \alpha_{t(2)} & \omega_{z(t(2))} & \dot{\alpha}_{t(2)} & \delta_{t(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \alpha_{t(N)} & \omega_{z(t(N))} & \dot{\alpha}_{t(N)} & \delta_{t(N)} \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} \frac{d\omega_{z(t(1))}}{dt} \\ \frac{d\omega_{z(t(2))}}{dt} \\ \vdots \\ \frac{d\omega_{z(t(N))}}{dt} \end{pmatrix},$$

$$\hat{a} = [\bar{M}_z^\alpha \bar{M}_z^{\omega_z} \bar{M}_z^{\dot{\alpha}} \bar{M}_z^\delta]^T.$$

To analyze the efficacy and stability of the Least Squares Method (LSM) for estimating aerodynamic coefficients, a numerical experiment was conducted with varying measurement noise levels. Measurement noise was modeled using random variables with normal distribution, characterized by zero mean and different standard deviation values ($\sigma = 0.01, 0.02, 0.03$). The quantitative results of the aerodynamic coefficient estimation, reflecting the error dependence on measurement noise intensity, are presented in Figures 4 and 5.

The research results demonstrate that the data obtained using the Runge — Kutta method provide significantly higher accuracy for estimating aerodynamic force coefficients, whereas Euler method-derived data yield superior accuracy for estimating aerodynamic moment coefficients across various

measurement noise levels. These findings underscore the critical importance of selecting appropriate numerical methods for aerodynamic modeling, as they directly impact parameter estimation reliability and, consequently, control system design.

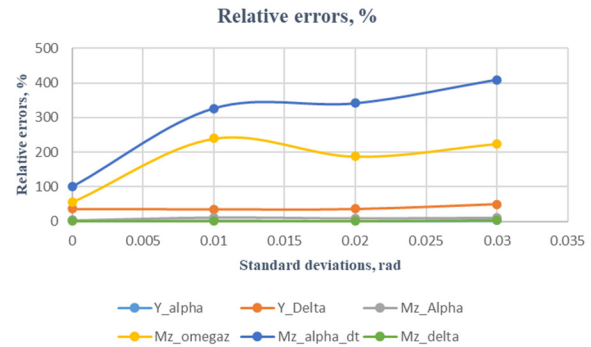


Figure 4. The results of the estimation of aerodynamic coefficients using data modeled by the Euler method
Source: by San Lin Aung in Excel

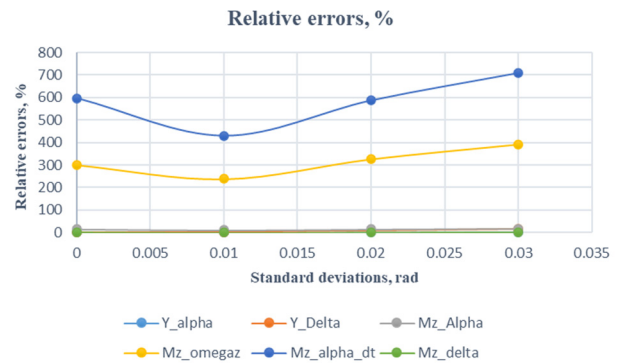


Figure 5. The results of the evaluation of aerodynamic coefficients using the data modeled by the Runge Kutta method
Source: by San Lin Aung in Excel

4. Aircraft Pitch Control System Using PID Controller

The aerodynamic coefficients were estimated using the Least Squares Method (LSM), which enabled the acquisition of the necessary parameters for designing an automatic pitch angle control system. The obtained coefficients are utilized to derive the transfer function relating the pitch rate to the elevator deflection, which represents a critical stage in control system development. This transfer

function is derived from equations describing the angle of attack (α) and pitch rate, establishing a mathematical relationship that quantifies how changes in elevator deflection (δ) affect the pitch

dynamics (Figure 6). This phase is essential for creating a reliable and precise control system that ensures effective regulation of aircraft angular motion.

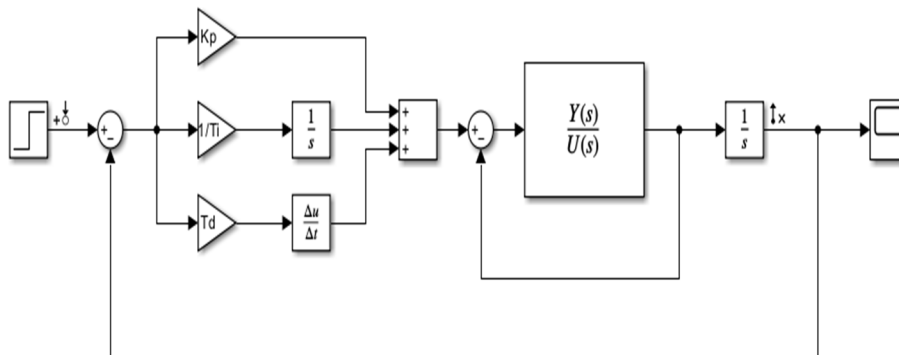


Figure 6. Structure diagram of the aircraft's automatic pitch control system

S o u r c e: by San Lin Aung in Simulink

Aircraft transfer functions via Laplace transformation can be expressed as:

$$\left(s - \overline{M_z}^{\omega_z}\right) W_{\omega_z}^{\delta_B}(s) + \left(-\overline{M_z}^{\dot{a}} s - \overline{M_z}^a\right) W_{\alpha}^{\delta_B}(s) = \overline{M_z}^{\delta_B};$$

$$-W_{\omega_z}^{\delta_B}(s) + (s + \bar{Y}^\alpha)W_\alpha^{\delta_B}(s) = -\bar{Y}^{\delta_B};$$

$$W_{\delta_B}^{\omega_z}(s) = \frac{\Delta\omega_z(s)}{\Delta\delta_B(s)} = \frac{\left(\overline{M_z^{\delta_B}} - \overline{Y^{\delta_B}} \overline{M_z^{\alpha}}\right)s + \overline{M_z^{\delta_B}} \overline{Y^{\alpha}} - \overline{Y^{\delta_B}} \overline{M_z^{\alpha}}}{s^2 + 2\xi_\alpha\omega_n s + \omega_n^2};$$

$$W_{\delta_B}^{n_y}(s) \Big|_{\bar{Y}^{\delta_B}=0} = \frac{v_0}{57,3g} \frac{\overline{M_z^{\delta_B}} \overline{Y}^a}{s^2 + 2\xi_a \omega_a s + \omega_a^2}.$$

In this study, a model that does not consider the elevator lift is used as a mathematical model of the first approximation.

$$\Delta \dot{\alpha} = \Delta \omega_z - \bar{Y}^\alpha \Delta \alpha$$

$$\Delta \dot{\omega}_z = \overline{M}_z^{-\alpha} \Delta \alpha + \overline{M}_z^{-\omega_z} \Delta \omega_z + \overline{M}_z^{-\dot{\alpha}} \Delta \dot{\alpha} + \overline{M}_z^{-\delta_B} \Delta \delta_B. \quad (8)$$

The transfer function from the elevator to the pitch rate through the Laplace transform $W_{\delta_B}^{(o_z)}(s)$ can be written as:

$$W_{\delta_B}^{\omega_z}(s) = \frac{\Delta\omega_z(s)}{\Delta\delta_B(s)} = \frac{\left(\overline{M_z}^{\delta_B}\right)\left(s + \overline{Y}^a\right)}{s^2 + 2\xi_{\omega_z}\omega_n s + \omega_n^2} \quad (9)$$

The initial PID controller coefficients were set empirically, followed by a linear analysis of the transient response of the system to step elevator deflection (Figure 7). The investigation results revealed the following dynamic performance indicators:

- Overshoot $\sigma = 22.9\%$, indicating pronounced oscillatory components during the transients;
- Rise time $t_{rise} = 1.53s$, reflecting high initial responsiveness;
- Settling time $t_{set} = 10.9s$, demonstrating insufficient damping in the initial controller configuration resulting in prolonged stabilization within the 2% tolerance band.

To address these deficiencies, automatic parametric optimization of the PID controller was implemented using gradient descent algorithms in Simulink, targeting settling-time minimization while maintaining acceptable overshoot levels. These findings underscore the necessity of adaptive approaches to tuning controllers in dynamically complex aerospace systems.

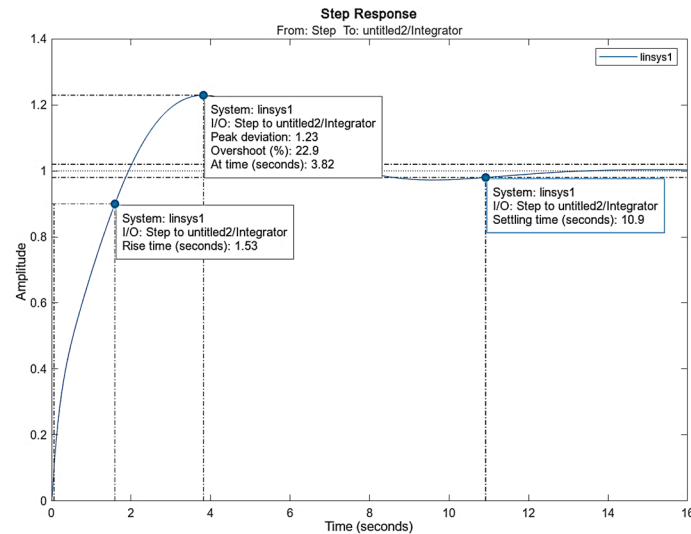


Figure 7. Transient function of the aircraft's automatic pitch control system using a PID controller at preset coefficient values

Source: by San Lin Aung in Simulink

The initial PID controller coefficients were adjusted using an automatic tuning algorithm implemented in Simulink (Figure 8). For the simplified mathematical model, excluding the actuator dynamics and physical constraints, the transient characteristics demonstrate high controller efficacy:

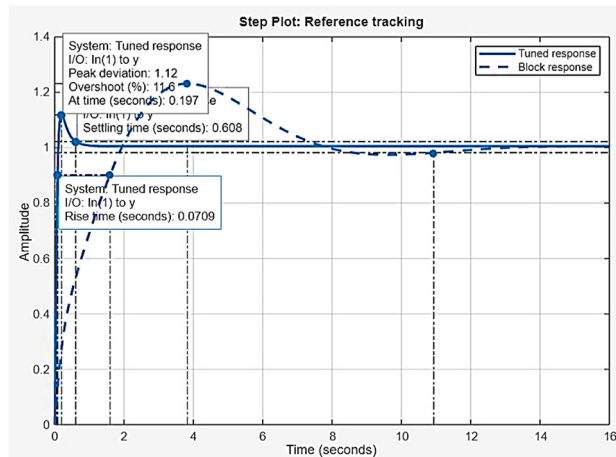


Figure 8. Transient function of the aircraft's automatic pitch control system using a PID controller with automatic tuning coefficient values

Source: by San Lin Aung in Simulink

▪ Overshoot $\sigma = 11.6\%$, reflecting moderate oscillatory components during transients within acceptable limits for aviation systems;

- Rise time $t_{rise} = 0.0709s$, indicating minimal system inertia when responding to control inputs;
- Settling time $t_{set} = 0.608s$, confirming the rapid attainment of steady state within the 2% tolerance band.

These parameters demonstrate the high system responsiveness and stability achieved through gradient-based optimization methods. However, the model limitations stemming from neglected actuator dynamics and real operational constraints necessitate further research for validation under near-physical conditions. These results establish a foundation for developing adaptive algorithms that account for nonlinear effects and external disturbance characteristics of aircraft control systems.

Conclusion

This study confirms the efficacy of integrating Euler and Runge — Kutta methods for solving aerodynamic modeling, parametric identification, and pitch control system synthesis tasks. It was established that the Runge — Kutta method provides enhanced accuracy for estimating aerodynamic force coefficients, whereas the Euler method demonstrates advantages for estimating moment coefficients under distinct measurement noise conditions. The developed pitch angle PID

controller, characterized by a rise time of 0.0709 s, overshoot $\sigma = 11.6\%$, and settling time of 0.608 s, validates the feasibility of achieving high-quality control despite noise disturbances in systems neglecting actuator dynamics.

The proposed methodology integrating numerical simulation, parameter identification, and adaptive controller synthesis demonstrates the potential for creating digital twins and their application in preliminary design stages, notwithstanding simplifications in the aerodynamic model. These results underscore the critical role of numerical method selection, which directly impacts estimation credibility and designed system reliability.

References

1. Efremov AV, Zakharchenko VF, Ovcharenko VN, Sukhanov VL. *Flight dynamics: Textbook for students of higher educational institutions*; edited by G.S. Byushgens. Moscow: Mechanical Engineering, 2017. (In Russ.) ISBN 978-5-9500368-0-4
2. Byushgens GS. *Aerodynamics, stability and controllability of supersonic aircraft*. Moscow: Nauka Publ.; 1998. (In Russ.) ISBN 5-02-015111-4
3. Du P, Zhao Qi, Wu X, Zhang L. Aerodynamic characteristics analysis of the transitional state of foldable-wing UAVs. *Journal of Physics: Conference Series*. 2025; 2977:012035. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/2977/1/012035> EDN: AZXORD
4. Averina TA, Rybakov KA. A modification of numerical methods for stochastic differential equations with first integrals. *Numerical Analysis and Applications*. 2019;12(3):203–218. <http://doi.org/10.1134/S1995423919030017> EDN: JRMVIX
5. Grauer J. An interactive MATLAB program for fitting transfer functions to frequency responses. *AIAA Scitech 2021 Forum, Conference Proceedings*; 2021 Jan 11–15 and 19–21; Virtual Event. 2021. <http://doi.org/10.2514/6.2021-1426>
6. Ashraf FF, Ali I. Feasibility analysis of numerical integration techniques in onboard flight control computer for impact point prediction. *Proceedings of 19th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*; 2022 Aug 16–20; Islamabad, Pakistan. IEEE; 2022:419–425. <http://doi.org/10.1109/IBCAST54850.2022.9990191>
7. Zhang M, Yao Y. Aircraft motion model based on numerical integration. *Asian Simulation Conference. AsiaSim 2017. Communications in Computer and Information Science*. 2017; Singapore: Springer Publ.; 2017: 751;518–528. http://doi.org/10.1007/978-981-10-6463-0_44
8. Korsun ON, Om MH. The practical rules for aircraft parameters identification based on flight test. *Metascience in Aerospace*. 2024;1(1):53–65. <http://doi.org/10.3934/mina.2024003>
9. Zolotukhin YuN, Kotov KYu, Svitova AM, Semyenyuk ED, Sobolev MA. Identification of the dynamics of a moving object with the use of neural networks. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2018; 54(6):617–622. <http://doi.org/10.15372/AUT201806010> EDN: YQZELR
10. Dipa SN, Sudha G. Longitudinal control of aircraft dynamics based on optimization of proportional–integral–derivative controller parameters. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2016;23(2):193–202. (In Russ.) EDN: VZAWPB
11. Ilyukhin SN, Toporkov AG, Koryanov VV, Ayupov RE, Pavlov NG. Actual aspects of control system development for advanced unmanned aerial vehicles. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2015;(9):12. (In Russ.) <http://doi.org/10.18698/2308-6033-2015-9-1450> EDN: VCFBKP
12. Vostrikov AS, Frantsuzova GA. Synthesis of PID controllers for nonlinear nonstationary objects. *Avtometriya*. 2015;51(5):53–60. (In Russ.) EDN: UYCHUL
13. Ghoreyshi M, Bergeron K, Jirásek A, Seidel J, Lofthouse AJ, Cummings RM. Computational aerodynamic modeling for flight dynamics simulation of ram-air parachutes. *Aerospace Science and Technology*. 2016;54:286–301. <http://doi.org/10.1016/J.AST.2016.04.024>
14. Abadeev EM, Piskunova OI, Tretyakov AV. Method of adaptive control for longitudinal motion of a small-size aircraft with limitation of the integral component signal. *Trudy MAI*. 2022;(124):18. (In Russ.) <http://doi.org/10.34759/trd-2022-124-18> EDN: FPXHWA
15. Eremin YeL. Adaptive system algorithms for an object with saturation and control delay. *Computer Science and Management Systems*. 2017;2(52):109–118. (In Russ.) <http://doi.org/10.22250/isu.2017.52.109-118> EDN: YPDXPJ
16. Sablina GV, Markova VA. Setting of parameters of the PID-controller in a system with a second-order object with a delay. *Avtometriya*. 2022;58(4):110–117. (In Russ.) <http://doi.org/10.15372/AUT20220411> EDN: RIZPWY
17. Ignatkin YuM, Makeev PV, Shomov AI. Computational modeling of applied tasks of helicopter aerodynamics based on non-linear vortical model of a rotor. *Trudy MAI*. 2016;(87):4. (In Russ.) EDN: WDJTZB
18. Lukyanov VV, Alekseev AN, Zemlyany ES, Chekanov KA. Airplane director control algorithm in landing mode. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2020; 11(107). (In Russ.) <http://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-11-2032>
19. Demin IO, Sablina GV. Research of methods for setting parameters of the PID controller. *Automatics & Software Engineering*. 2020;1(31):174–181. (In Russ.) EDN: CJCQFM

Список литературы

1. Ефремов А.В., Захарченко В.Ф., Овчаренко В.Н., Суханов В.Л. Динамика полета / под ред. Академика РАН Г.С. Бюшгенса. Москва : Машиностроение, 2017. 776 с. ISBN 978-5-9500368-0-4
2. Бюшгенс Г.С. Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых самолетов. Москва : Наука, 1998. 402 с. ISBN 5-02-015111-4
3. Du P., Zhao Qi., Wu X., Zhang L. Aerodynamic characteristics analysis of the transitional state of foldable-wing UAVs // *Journal of Physics: Conference Series*. 2025. Vol. 2977. Article no. 012035. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/2977/1/012035>
4. Averina T.A., Rybakov K.A. A modification of numerical methods for stochastic differential equations with first integrals // *Numerical Analysis and Applications*. 2019. Vol. 12. No. 3. P. 203–218. <http://doi.org/10.1134/S1995423919030017> EDN: JRMYIX
5. Grauer J. An interactive MATLAB program for fitting transfer functions to frequency responses // *AIAA Scitech 2021 Forum, Conference Proceedings*. 2021. <http://doi.org/10.2514/6.2021-1426>
6. Ashraf F.F., Ali I. Feasibility analysis of numerical integration techniques in onboard flight control computer for impact point prediction // *Proceedings of 19th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*, Islamabad, Pakistan, 2022. P. 419–425. <http://doi.org/10.1109/IBCAST54850.2022.9990191>
7. Zhang M., Yao Y. Aircraft motion model based on numerical integration // *Asian Simulation Conference. AsiaSim 2017. Communications in Computer and Information Science*. Singapore : Springer Publ.; 2017. Vol. 751. P. 518–528. http://doi.org/10.1007/978-981-10-6463-0_44
8. Korsun O.N., Om M.H. The practical rules for aircraft parameters identification based on flight test data // *Metascience in Aerospace*. 2024. Vol. 1. No. 1. P. 53–65. <http://doi.org/10.3934/mina.2024003>
9. Zolotukhin Yu.N., Kotov K.Yu., Svitova A.M., Semenyuk E.D., Sobolev M.A. Identification of the dynamics of a moving object with the use of neural networks. Optoelectronics // *Instrumentation and Data Processing*. 2018. Vol. 54. No. 6. P. 617–622. <http://doi.org/10.15372/AUT201806010> EDN: YQZELR
10. Дина С.Н., Судха Г. Продольное регулирование динамики самолета на основе оптимизации параметров пропорционально-интегрально-дифференциального регулирования // *Теплофизика и аэромеханика*. 2016. Т. 23. № 2. С. 193–202. EDN: VZAWPB
11. Илюхин С.Н., Топорков А.Г., Корянов В.В., Аюпов Р.Э., Павлов Н.Г. Актуальные аспекты разработки системы управления перспективными беспилотными летательными аппаратами // *Инженерный журнал: Наука и инновации*. 2015. № 9. С. 12. <http://doi.org/10.18698/2308-6033-2015-9-1450> EDN: VCFBKP
12. Востриков А.С., Французова Г.А. Синтез ПИД-регуляторов для нелинейных нестационарных объектов // *Автометрия*. 2015. Т. 51. № 5. 2015. С. 53–60. EDN: UYCHUL
13. Ghoreysy M., Bergeron K., Jirásek A., Seidel J., Lofthouse A.J., Cummings R.M. Computational aerodynamic modeling for flight dynamics simulation of ram-air parachutes // *Aerospace Science and Technology*. 2016. Vol. 54. P. 286–301. <http://doi.org/10.1016/J.AST.2016.04.024>
14. Абадеев Э.М., Пискунова О.И., Третьяков А.В. Способ адаптивного управления продольным движением малогабаритного самолета с ограничением сигнала интегральной компоненты // *Труды МАИ*. 2022. № 124. С. 18. <http://doi.org/10.34759/trd-2022-124-18> EDN: FPXNWA
15. Еремин Е.Л. Алгоритмы адаптивной системы для объекта с насыщением и запаздыванием управления // *Информатика и системы управления*. 2017. № 2 (52). С. 109–118. <http://doi.org/10.22250/isu.2017.52.109-118> EDN: YPDXPJ
16. Саблина Г.В., Маркова В.А. Настройка параметров ПИД-регулятора в системе с объектом второго порядка с запаздыванием // *Автометрия* 2022. Т. 58. № 4. С. 110–117. <http://doi.org/10.15372/AUT20220411> EDN: RIZPWY
17. Игнаткин Ю.М., Макеев П.В., Шомов А.И. Численное моделирование прикладных задач аэродинамики вертолета на базе нелинейной лопастной вихревой модели винта // *МАИ*. 2016. № 87. С. 4. EDN: WDJTZB
18. Лукьянов В.В., Алексеев А.Н., Земляной Е.С., Чеканов К.А. Алгоритм директорного управления самолетом в режиме посадки // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2020. № 11 (107). <http://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-11-2032>
19. Демин И.О., Саблина Г.В. Исследование методов настройки параметров ПИД-регулятора // *Автоматика и программная инженерия*. 2020. № 1 (31). С. 174–181. EDN: CJCQFM

About the author

Lin Aung San, Master student, Higher Education Center of the Defence Services Academy, Pyin Oo Lwin, Myanmar; ORCID: 0009-0002-2475-2875; e-mail: sunlinaung91788@gmail.com

Сведения об авторе

Сан Лин Аунг, магистрант, Центр высшего образования Академии вооруженных сил, Пьин Оо Лвин, Мьянма; ORCID: 0009-0002-2475-2875; e-mail: sunlinaung91788@gmail.com



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-4-399-411

EDN: CXVECY

Научная статья / Research article

Влияние осевой нагрузки на работоспособность шариковых радиальных подшипников

Ю.В. Белоусов^{a,b,✉}, С.Л. Шамбина^b, Ф.В. Рекач^b, О.Л. Киреев^b

^aМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

^bРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ juvbelousov@bmstu.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 3 марта 2025 г.

Доработана: 25 апреля 2025 г.

Принята к публикации: 11 мая 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. В качестве опор валов часто используются шариковые радиальные подшипники. Они предназначены для восприятия радиальной нагрузки, однако оказываются достаточно работоспособными при действии также и осевой нагрузки. Для определения степени влияния осевой нагрузки на работоспособность указанных подшипников рассмотрен характер взаимодействия тел качения с кольцами шариковых радиальных однорядных подшипников, установленных враспор, под действием комбинированной нагрузки. Разработана методика определения предельной радиальной и осевой нагрузки для данных подшипников. Получены выражения, связывающие осевую нагрузку с неиспользованной радиальной. На конкретных примерах показано, что наибольшая реакция опор с шариковыми радиальными однорядными подшипниками при действии на вал комбинированной нагрузки, когда осевая нагрузка является предельной, может превышать в два раза аналогичную реакцию опор при действии на вал только радиальной нагрузки той же величины. Слишком большая погрешность в определении реакций опор вала сильно снижает работоспособность подобранных для него подшипников, ускоряя их выход из строя. Кроме того, при составлении расчетной схемы вала, в качестве опор которого используются шариковые радиальные подшипники, вал всегда представляется как балка на двух шарнирных опорах. Одна из опор — неподвижный шарнир, другая — подвижный шарнир. Установлено, что при действии комбинированной нагрузки обе опоры работают как неподвижные шарниры, поскольку обе воспринимают осевую нагрузку. При этом одна часть вала между опорами оказывается растянутой, а другая — сжатой. Границей между растянутой и сжатой зонами является точка приложения осевой силы.

Ключевые слова: реакция опор, тела качения, радиальная и осевая нагрузка, свободный угол контакта, шарнирные опоры

Вклад авторов

Белоусов Ю.В. — концепция исследования, написание текста, визуализация, редактирование, список литературы. Шамбина С.Л., Рекач Ф.В. — систематизация и обработка данных. Киреев О.Л. — обзор литературы. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

© Белоусов Ю.В., Шамбина С.Л., Рекач Ф.В., Киреев О.Л., 2025



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

Белоусов Ю.В., Шамбина С.Л., Рекач Ф.В., Киреев О.Л. Влияние осевой нагрузки на работоспособность шариковых радиальных подшипников // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 4. С. 399–411. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-399-411>

Influence of Axial Load on the Performance of Ball Radial Bearings

Yuriy V. Belousov^{a,b}✉, Svetlana L. Shambina^b, Fedor V. Rekach^b, Oleg L. Kireev^b

^a Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, Russian Federation

^b RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ juvbelousov@bmstu.ru

Article history

Received: March 3, 2025

Revised: April 25, 2025

Accepted: May 11, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. Ball radial bearings are often used as shaft supports. They are designed to withstand radial loads. However, they are also quite efficient under axial loads. To determine the degree of influence of axial loads on the performance of these bearings, the nature of the interaction of rolling elements with the rings of single-row ball radial bearings installed in a thrust manner under a combined load is considered. A method for determining the ultimate radial and axial loads for these bearings has been developed. Expressions have been obtained that relate the axial load to the unused radial load. Specific examples have shown that the greatest reaction of supports with single-row ball radial bearings under a combined load on the shaft, when the axial load is ultimate, can be twice as great as a similar reaction of supports under only a radial load of the same magnitude on the shaft. An excessively large error in determining the reactions of shaft supports significantly reduces the performance of the bearings selected for it, accelerating their failure. In addition, when a calculation scheme for a shaft supported by radial ball bearings is drawn up, the shaft is always represented as a beam on two hinged supports. One of the supports was a fixed hinge, and the other was a movable hinge. It has been established that under the action of a combined load, both supports operate as fixed hinges because both perceive an axial load. In this case, one part of the shaft between the supports was stretched, and the other was compressed. The boundary between the stretched and compressed zones was the point of application of the axial force.

Keywords: reaction of supports, rolling elements, radial and axial load, free contact angle, articulated supports

Authors' contribution

Belousov Yu.V. — research concept, text writing, visualization, editing, references; Shambina S.L., Rekach F.V. — systematization and data processing. Kireev O.L. — literature review. All the authors have read the final version of the article and approved it.

For citation

Belousov YuV, Shambina SL., Rekach FV, Kireev OL. Influence of axial load on the performance of ball radial bearings. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(4):399–411. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-399-411>

Введение

В качестве опор валов и вращающихся осей довольно часто используются шариковые радиальные подшипники. Эти подшипники имеют простую конструкцию, удобны в эксплуатации,

работают с минимальными потерями на трение, способны работать с высокими скоростями вращения, производятся в широком диапазоне размеров. Кроме того, данные подшипники достаточно универсальны, так как позволяют воспринимать действующие на валы в обоих напра-

влениях как радиальные, так и осевые нагрузки. Эти нагрузки воспринимаются телами и дорожками качения подшипников, площадки контакта которых очень малы. Поэтому напряжения в местах контакта очень высокие. Так, нормальные напряжения при начальном точечном контакте тел качения с дорожками качения могут достигать 5000 МПа [1–3]. Поэтому при конструировании опор с данными подшипниками возникает необходимость в определении напряжений и деформаций в контакте шариков с дорожками качения.

Высокие напряжения сжатия действуют только в зоне контакта тел качения. Поэтому прочностные свойства этих подшипников зависят в основном от напряжений, возникающих на поверхности контакта. Деформации в контакте поверхностей качения, ввиду их высокой твердости, сравнительно невелики и их учет обычно не требуется.

Контактные напряжения, возникающие в телах качения, зависят от нагрузки, которую они воспринимают, размеров и формы контактирующих тел, их упругих характеристик. Размеры, форма контактирующих тел, а также их упругие характеристики обычно известны заранее, поскольку данные подшипники стандартизованы. Неизвестной является нагрузка, воспринимаемая подшипниками. Она довольно просто определяется при действии на вал только радиальных сил. При одновременном действии на вал радиальных и осевых сил определение данной нагрузки значительно усложняется, поскольку заранее неизвестно, каким образом под нагрузкой в подшипниках будут располагаться тела качения [4–8]. Кроме того, для указанных подшипников неизвестной является величина предельной осевой нагрузки. В частности, общеизвестным считается тот факт, что она не должна превышать 70 % от неиспользованной радиальной нагрузки. Однако никакого теоретического обоснования данное положение не имеет.

Цель исследования — определение степени влияния осевой нагрузки на работоспособность шариковых радиальных подшипников.

1. Методы исследования

Рассмотрим взаимодействие тел качения и колец шариковых радиальных однорядных подшипников, установленных враспор, под действием комбинированной нагрузки. То есть при действии на вал, установленный на данных подшипниках, осевой и радиальной сил. Осевая сила — это сила F_a , а радиальная сила — это сила $F_{r\sum}$, которая, по существу, является векторной суммой двух сил: собственно радиальной силы F_r и окружной силы F_t , сообщающей валу вращательное движение. То есть $\vec{F}_{r\sum} = \vec{F}_r + \vec{F}_t$. Изгибающий момент при переносе силы F_a из зоны ее действия на ось вала учитывать не будем. Кроме того, не будем учитывать перекося колец подшипника вследствие изгиба вала ввиду его малости. Так, допустимый угол взаимного перекося колец шариковых радиальных однорядных подшипников при радиальном нагружении для подшипников, например, нормальной группы радиального зазора составляет всего 8 минут [5].

У большинства подшипников данного типа в исходном ненагруженном состоянии между наружным кольцом и телами качения имеется радиальный зазор g_r . Он предполагает некоторую свободу взаимного перемещения колец в радиальном и осевом направлениях. Величину радиальных зазоров в данных подшипниках качения выбирают с учетом эксплуатационных характеристик опор (грузоподъемности, быстротходности, допустимых величин радиального и осевого биения, габаритных размеров и расстояния между опорами), условий монтажа и регулирования подшипников (посадочных натягов, температурных колебаний в подшипниковом узле, вида смазки и способа ее подачи) [9–11].

Приложим к валу одновременно радиальную $F_{r\sum}$ и осевую F_a силы. Направим силу $F_{r\sum}$ вертикально вниз (рис. 1). Под действием силы F_a вал вместе с внутренними кольцами подшипников сместится в осевом направлении,

а под действием силы $F_{r\Sigma}$ изогнется. При этом оба процесса происходят одновременно. Сила $F_{r\Sigma}$ почти всегда больше силы F_a , а прогиб вала меньше величины его перемещения в осевом направлении при выборке зазора g_r . Тогда следует ожидать, что прогиб вала закончится быс-

трее его осевого перемещения. Поэтому осевое перемещение вала его изгибу препятствовать не будет. В этой связи бесспорными оказываются выводы авторов источников [12; 13] об использовании принципа суперпозиции перемещений при комбинированном нагружении вала.

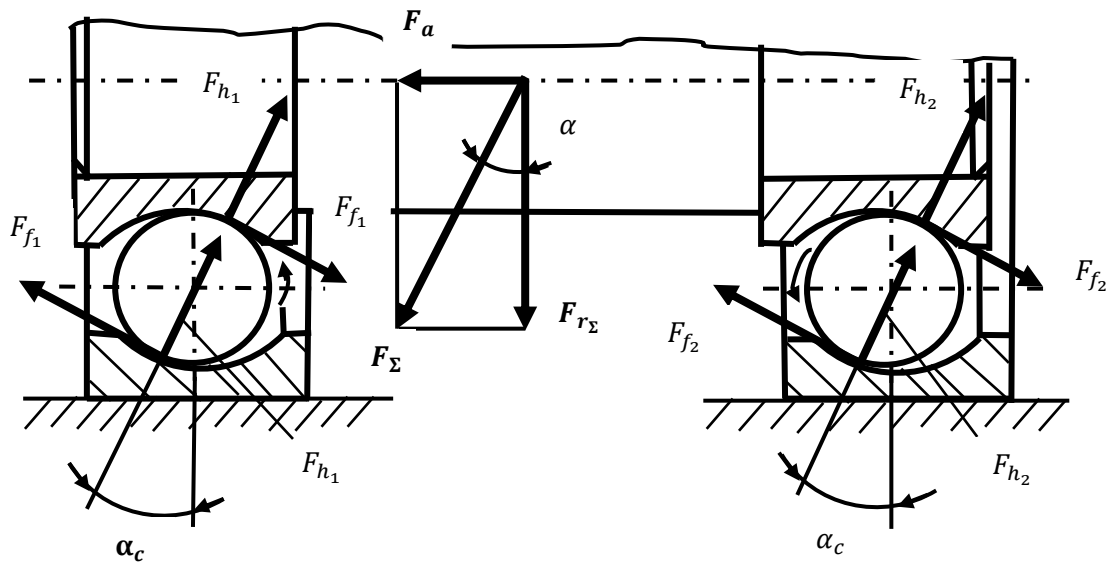


Рис. 1. Схема нагружения тел качения нижней части подшипников

Источник: выполнено Ю.В. Белоусовым

Figure 1. Loading diagram of the rolling elements of the lower part of the bearings

Source: by Yu.V. Belousov

При достаточной величине силы F_a вал сместится в крайнее осевое положение. При этом угол контакта тел качения-шариков с дорожками качения будет равен α_c . Это максимальный угол контакта шариков с дорожками качения, который называется свободным углом контакта. Величина свободного угла контакта у шарикового радиального однорядного подшипника может быть определена по следующей формуле [14]:

$$\alpha_c = \arccos\left(1 - \frac{g_r}{2B}\right), \quad (1)$$

где $B = (f_B + f_H - 1)D_w$; D_w — диаметр тела качения; $f_B = r_B / D_w$, $f_H = r_H / D_w$, r_B и r_H — радиусы дорожек качения внутреннего и наруж-

ного колец соответственно, расположенные в плоскости, перпендикулярной направлению вращения вала.

Определим величину осевой силы F_a , необходимой для перемещения вала в крайнее осевое положение. Для этого все силы, действующие на вал в крайнем осевом положении, спроецируем на оси координат. В итоге получим

$$(F_{h_1} + F_{h_2}) \sin \alpha_c + (F_{f_1} + F_{f_2}) \cos \alpha_c = F_a, \quad (2)$$

$$(F_{h_1} + F_{h_2}) \cos \alpha_c - (F_{f_1} + F_{f_2}) \sin \alpha_c = F_{r\Sigma}, \quad (3)$$

где F_{h_1} , F_{h_2} — суммарные нормальные силы, возникающие в контакте шариков с дорожками качения в нагруженной зоне внутренних колец подшипников; F_{f_1} , F_{f_2} — суммарные силы

сопротивления качению шариков при их установке в требуемое положение.

Если пренебречь весом шарика, то силу, необходимую для его перекачивания между двумя наклонными поверхностями, можно определить следующим образом:

$$F_f = \frac{F_K D_w}{D_w / 2} = 2F_K = 2 \frac{2Nf_K}{D_w} = \frac{4Nf_K}{D_w}, \quad (4)$$

где F_K — сила сопротивления качению шарика; N — нормальная нагрузка на шарик; f_K — коэффициент трения качения шариков по дорожкам подшипников $f_K = 0,001$ см [15; 16].

Тогда

$$F_{f_1} = \sum_1^n \frac{4N_1 f_K}{D_w} = \frac{4f_K}{D_w} \sum_1^n N_1 = \frac{4f_K}{D_w} \frac{4,37F_{h_1}}{z} \times \\ \times [1 + 2\cos^{3/2}\gamma + \dots + 2\cos^{3/2}(n\gamma)], \quad (5)$$

$$F_{f_2} = \sum_1^n \frac{4N_2 f_K}{D_w} = \frac{4f_K}{D_w} \sum_1^n N_2 = \frac{4f_K}{D_w} \frac{4,37F_{h_2}}{z} \times \\ \times [1 + 2\cos^{3/2}\gamma + \dots + 2\cos^{3/2}(n\gamma)], \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha_c + \frac{17,48 f_K \cos \alpha_c}{z D_w} [1 + 2\cos^{3/2}\gamma + \dots + 2\cos^{3/2}(n\gamma)]}{\cos \alpha_c - \frac{17,48 f_K \sin \alpha_c}{z D_w} [1 + 2\cos^{3/2}\gamma + \dots + 2\cos^{3/2}(n\gamma)]}. \quad (9)$$

2. Результаты и обсуждение

Из выражения (9) видно, что $\alpha > \alpha_c$. При отсутствии сопротивления перекачиванию шариков эти углы были бы равны. Выясним, как сильно эти углы отличаются. В качестве примера рассмотрим шариковый радиальный однорядный подшипник № 207. Внутренний диаметр данного подшипника $d = 35$ мм, наружный диаметр $D = 72$ мм, диаметр тела качения $D_w = 11,11$ мм, радиальный зазор для подшипника нормальной группы радиального зазора $g_r = 6 \dots 20$ мкм.

а

$$F_{f_1} + F_{f_2} = (F_{h_1} + F_{h_2}) \frac{17,48 f_K}{z D_w} \times \\ \times [1 + 2\cos^{3/2}\gamma + \dots + 2\cos^{3/2}(n\gamma)], \quad (7)$$

где γ — угол между смежными телами качения подшипника; n — количество пар тел качения, воспринимающих, кроме центрального, нагрузку на подшипник.

Разделим выражение (2) на выражение (3). Тогда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_a}{F_{r_c}} = \frac{(F_{h_1} + F_{h_2}) \sin \alpha_c + (F_{f_1} + F_{f_2}) \cos \alpha_c}{(F_{h_1} + F_{h_2}) \cos \alpha_c - (F_{f_1} + F_{f_2}) \sin \alpha_c}, \quad (8)$$

где α — угол наклона суммарной силы F_{r_c} , действующей на вал, к плоскости перпендикулярной его оси.

Подставив в выражение (8) сумму $F_{f_1} + F_{f_2}$ из выражения (7), получим (9).

Зная угол α , при известной радиальной силе F_{r_c} можно определить осевую силу F_a .

Для принятых значений $f_B = f_H = 0,515$ [17] и

$$B = (f_B + f_H - 1) D_w = \\ = (0,515 + 0,515 - 1) \cdot 11,11 = 0,3333 \text{ мм},$$

тогда

$$\cos \alpha_c = 1 - \frac{g_r}{2B} = 1 - \frac{0,006 \dots 0,02}{2 \cdot 0,3333} = 0,991 \dots 0,97,$$

то есть $\alpha_c = 7,69^\circ \dots 14,07^\circ$.

При минимальном значении угла $\alpha_c = 7,69^\circ$ по формуле (9) находим, что $\operatorname{tg} \alpha = 0,1394$, что

соответствует углу $\alpha = 7,94^\circ$. При максимальном значении угла $\alpha_c = 14,07^\circ$, $\operatorname{tg} \alpha = 0,2552$, то есть $\alpha = 14,32^\circ$. В первом случае угол α отличается от угла α_c на 3,3 %, во втором — на 1,8 %. Для подшипников большего диаметра той же нормальной группы радиального зазора данное отличие еще меньше. Поэтому с достаточной степенью точности можно считать, что минимальное значение угла α между суммарной F_Σ и радиальной F_{r_Σ} силами, действующими на вал при его смещении в крайнее осевое положение, соответствует свободному углу контакта α_c . В этом случае силами F_{f_1} и F_{f_2} можно пренебречь, а нагрузку на вал будут воспринимать только тела качения, находящиеся в нижней части подшипников.

Их суммарная реакция

$$F_{h_1} + F_{h_2} = \frac{F_{r_\Sigma}}{\cos \alpha_c}. \quad (10)$$

Силы F_{h_1} и F_{h_2} в общем случае не равны.

При дальнейшем увеличении осевой силы F_a угол α станет больше угла α_c . Суммарной реакции тел качения в нижней части подшипников R_1 и R_2 (рис. 2) не будет хватать для компенсации силы F_a . Поэтому станут нагружаться тела качения также и в верхней части подшипников. С их стороны будут действовать реакции R_1^1 и R_2^1 . В этом случае равновесие вала будет обеспечено, когда

$$\sum R_i + \sum R_i^1 = F_{r_\Sigma} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \alpha_c}; \quad (11)$$

$$\sum R_i - \sum R_i^1 = \frac{F_{r_\Sigma}}{\cos \alpha_c}. \quad (12)$$

Сложив формулы (11) и (12), получим

$$\sum R_i = \frac{F_{r_\Sigma}}{2} \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \alpha_c} + \frac{1}{\cos \alpha_c} \right). \quad (13)$$

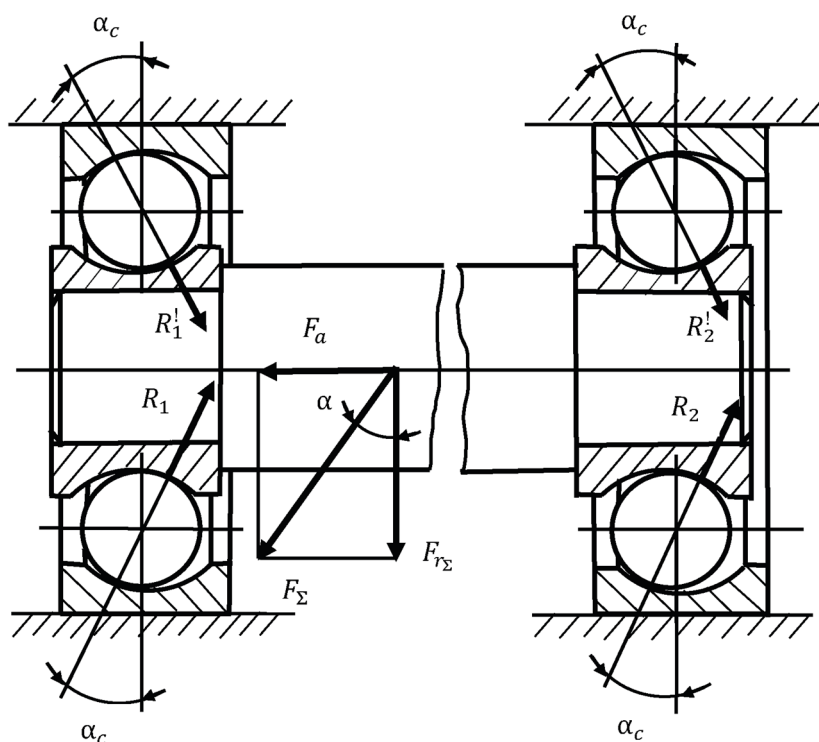


Рис. 2. Схема сил, действующих на вал
Источник: выполнено Ю.В. Белоусовым

Figure 2. Diagram of forces acting on the shaft
Source: by Yu.V. Belousov

Максимальное значение угла α будет соответствовать предельной нагрузке на тела качения в подшипниках вала.

Подставив в формулу (13) $\sum R_i = SF_{r_\Sigma}$ где $S = F_{r_\Sigma}^{\max} / F_{r_\Sigma}$, а $F_{r_\Sigma}^{\max}$ — максимальная радиальная нагрузка на вал, получим выражение для определения максимального угла $\alpha_{\max}$ в следующем виде:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\max} = 2S \sin \alpha_c - \operatorname{tg} \alpha_c. \quad (14)$$

Для определения коэффициента S необходимо найти максимальную радиальную нагрузку на вал $F_{r_\Sigma}^{\max}$ и сравнить с действующей F_{r_Σ} . Максимальная радиальная нагрузка — это нагрузка, превышение которой может вызвать пластические деформации на дорожке качения внутреннего наиболее нагруженного кольца подшипника.

Нижнюю оценку максимальной силы, действующей на наиболее нагруженное тело качения подшипника, превышение которой может привести к появлению пластических деформаций, можно получить по следующей формуле [18]:

$$F_{01_{\max}} = 86,74 \left(\frac{\eta}{\Sigma \rho} \right)^2 \left(\frac{\sigma_m}{n_\sigma} \right)^3, \quad (15)$$

где $\Sigma \rho$ — сумма главных кривизн контактирующих тел (характеризует форму взаимодействующих тел); η — коэффициент, учитывающий упругие характеристики контактирующих тел (для стальных деталей $\eta = 0,87 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^2 / \text{Н}$; n_σ — коэффициент, зависящий от разности кривизн Θ ; σ_T — предел текучести материала деталей подшипника.

Реакцию максимально нагруженной опоры можно найти по известной формуле

$$R_{\max} = \max(R_1; R_2) = \frac{F_{01_{\max}} z}{4,37}, \quad (16)$$

где z — количество тел качения в подшипнике данной опоры.

Тогда

$$F_{r_\Sigma}^{\max} = R_{\max} (1 + m), \quad (17)$$

где $m = R_{\min} / R_{\max}$ — соотношение между реакциями опор.

Определим, например, максимальную нагрузку на вал, установленный на подшипниках № 207:

■ средний диаметр подшипника:

$$d_m = (d + D) / 2 = (35 + 72) / 2 = 53,5 \text{ мм};$$

■ диаметр внутреннего кольца по дну желоба

$$d_1 = d_m - D_w = 53,5 - 11,11 = 42,39 \text{ мм};$$

■ радиус желоба:

$$r_{\text{ж}} = 0,515 D_w = 0,515 \cdot 11,11 = 5,72 \text{ мм}.$$

Материал шариков и внутреннего кольца ШХ15 (твердость поверхности 62...65 HRC₃).

Сумма главных кривизн сопряженных поверхностей тел качения и внутреннего кольца подшипника

$$\begin{aligned} \Sigma \rho &= \frac{2}{D_w} + \frac{2}{D_w} - \frac{1}{r_{\text{ж}}} + \frac{2}{d_1} = \\ &= \frac{4}{11,11} - \frac{1}{5,72} + \frac{2}{42,39} = 0,2324 \text{ мм}^{-1}. \end{aligned}$$

Разность кривизн

$$\Theta = \frac{-\frac{1}{r_{\text{ж}}} + \frac{2}{d_1}}{\Sigma \rho} = \frac{-\frac{1}{5,72} + \frac{2}{42,39}}{0,2324} = -0,549.$$

Для данного значения Θ по таблице [14] находим $n_\sigma = 0,9262$.

Для стали ШХ15 с твердостью поверхности 62...65 HRC₃ среднее значение предела текучести $\overline{\sigma_T} = 1050 \text{ МПа}$. Нижняя оценка предела текучести $\sigma_T = \overline{\sigma_T} - u_p \vartheta$, где u_p — квантиль нормального распределения, ϑ — среднее

квадратическое отклонение ($\vartheta = 175$ МПа).
С надежностью 95 % получим

$$\sigma_T = 1050 - 1,645 \cdot 175 = 762 \text{ МПа.}$$

Подставим эти данные в формулу (15).
Тогда

$$F_{01_{\max}} = 86,74 \left(\frac{0,87 \cdot 10^{-5}}{0,2324} \right)^2 \left(\frac{762}{0,9262} \right)^3 = 67 \text{ Н.}$$

Нижнюю оценку силы, действующей на наиболее нагруженную опору, превышение которой может вызвать появление пластических деформаций деталей подшипника, определим по формуле (16): $R_{\max} = 67 \cdot 9 / 4,37 = 138$ Н. Максимальную радиальную нагрузку на вал для коэффициента m , равного например 0,8, найдем по формуле (17):

$$F_{r_{\Sigma}}^{\max} = 138(1 + 0,8) = 248,4 \text{ Н.}$$

Если $S = 2$, то

$$F_{r_{\Sigma}} = F_{r_{\Sigma}}^{\max} / 2 = 248,4 / 2 = 124,2 \text{ Н.}$$

По формуле (14) находим, что для подшипника № 207 с минимальным радиальным зазором $g_r = 6$ мкм

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_{\max} &= 2 \cdot 2 \cdot \sin 7,69^\circ - \operatorname{tg} 7,69^\circ = 0,4 \\ (\alpha_{\max} &= 21,8^\circ), \end{aligned}$$

когда

$$\begin{aligned} F_{r_{\Sigma}} &= 100 \text{ Н} \quad (S = 248,4 / 100 = 2,484), \\ \operatorname{tg} \alpha_{\max} &= 2 \cdot 2,484 \cdot \sin 7,69^\circ - \operatorname{tg} 7,69^\circ = 0,554 \\ (\alpha_{\max} &= 29^\circ). \end{aligned}$$

В первом случае сила F_a составляет 40 % от неиспользованной радиальной нагрузки, во втором случае — 37,3 %.

Неиспользованная радиальная нагрузка

$$F_{r_{\Sigma}}^H = F_{r_{\Sigma}}^{\max} - F_{r_{\Sigma}} = F_{r_{\Sigma}} (S - 1). \quad (18)$$

Найдем отношение $F_{a_{\max}} / F_{r_{\Sigma}}^H$:

$$k = \frac{F_{a_{\max}}}{F_{r_{\Sigma}}^H} = \frac{F_{r_{\Sigma}} (2S \sin \alpha_c - \operatorname{tg} \alpha_c)}{F_{r_{\Sigma}} (S - 1)}. \quad (19)$$

Из выражения (18) определим величину S :

$$S = \frac{k - \operatorname{tg} \alpha_c}{k - 2 \sin \alpha_c}. \quad (20)$$

Формула (20) позволяет определить величину S (при $S > 1$ в зависимости от той доли, которую осевая сила может составлять от неиспользованной радиальной нагрузки. Так, для того же подшипника № 207 при $k = 0,7$ (70 %) $S = 1,31$. Когда $k = 1$ (100 %) $S = 1,18$ $k = 1,2$ (120 %) $S = 1,14$. Таким образом, утверждение о том, что предельная осевая нагрузка не должна превышать 70 % от неиспользованной радиальной, лишено основания.

При составлении расчетной схемы вала, в качестве опор которого используются шариковые радиальные подшипники, вал представляют как балку на двух опорах. Одна из опор — неподвижный шарнир, другая — подвижный шарнир. В этом случае вал деформируется только на участке между точкой приложения силы F_a и шарнирно-неподвижной опорой (сжимается), а остальная часть вала (между силой F_a и шарнирно-подвижной опорой) не деформируется [19]. Однако характер деформации вала между опорами в данном случае иной. Судя по рис. 2, правая часть вала (от силы F_a до правой опоры) растянута, а левая (от силы F_a до левой опоры) сжата. Растягивающая сила $F_t = (R_2 + R_2') \sin \alpha_c$ формируется в правой опоре, а сжимающая $F_c = (R_1 + R_1') \sin \alpha_c$ — в левой. Поэтому на расчетной схеме вала обе опоры должны быть шарнирно-неподвижными.

Схема нагружения вала и эпюра продольных сил приведены на рис. 3, а также показаны вертикальные и горизонтальные реакции опор.

Вертикальная реакция в каждой опоре являются суммой двух реакций: суммарной вертикальной реакции тел качения нижней части подшипников ($R_1' \cos \alpha_c$ и $R_2' \cos \alpha_c$) и суммарной вертикальной реакции тел качения верхней части подшипников ($R_1' \sin \alpha_c$ и $R_2' \sin \alpha_c$). Используя соотношение между реакциями $R_2 / R_1 = m = a / b$, из выражений (11) и (12) можно получить формулы для определения всех нормальных реакций:

$$R_1 = \frac{F_{r_\Sigma}}{2} \frac{b}{a+b} \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \alpha_c} + \frac{1}{\cos \alpha_c} \right), \quad (21)$$

$$R_1' = \frac{F_{r_\Sigma}}{2} \frac{b}{a+b} \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \alpha_c} - \frac{1}{\cos \alpha_c} \right), \quad (22)$$

$$R_2 = \frac{F_{r_\Sigma}}{2} \frac{a}{a+b} \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \alpha_c} + \frac{1}{\cos \alpha_c} \right), \quad (23)$$

$$R_2' = \frac{F_{r_\Sigma}}{2} \frac{a}{a+b} \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \alpha_c} - \frac{1}{\cos \alpha_c} \right). \quad (24)$$

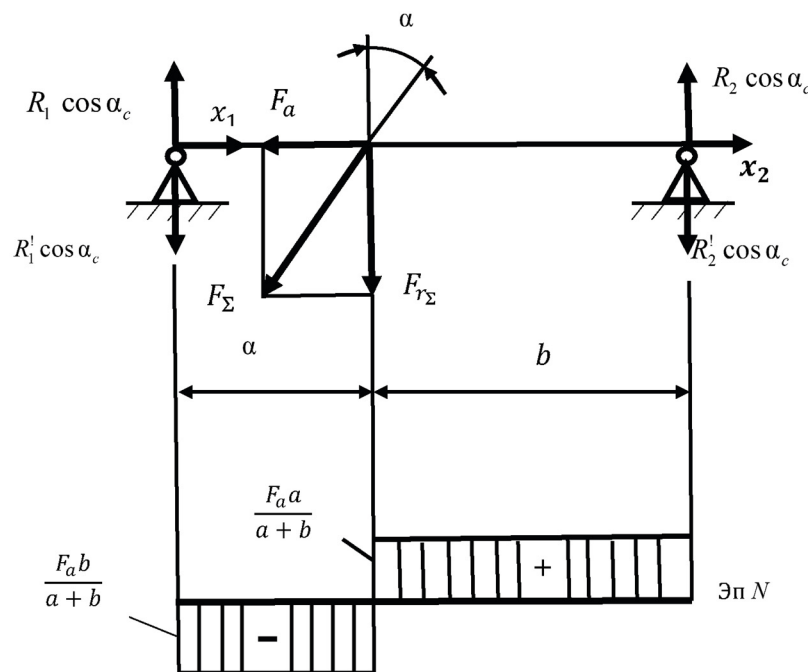


Рис. 3. Схема нагружения вала и эпюра продольных сил

Источники: выполнено Ю.В. Белоусовым

Figure 3. Shaft loading diagram and longitudinal force diagram

Source: by Yu.V. Belousov

Горизонтальные реакции опор определяются следующим образом:

$$x_1 = (R_1 + R_1') \sin \alpha_c = \frac{F_{r_\Sigma} b}{a+b} \operatorname{tg} \alpha = \frac{F_a b}{a+b} \quad (25)$$

$$\text{и} \quad x_2 = (R_2 + R_2') \sin \alpha_c = \frac{F_{r_\Sigma} a}{a+b} \operatorname{tg} \alpha = \frac{F_a a}{a+b}. \quad (26)$$

Очевидно, что наибольшая из всех реакций опор, которая должна использоваться при подборе подшипников (в данном случае это R_1), будет больше реакции $R_{1T} = F_{r_\Sigma} b / (a+b)$, которая обычно принимается в подобной ситуации¹ [19].

¹ Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. 2-е изд., перераб. и доп. Киев : Наук. Думка, 1988. 736 с.

Даже если $\alpha = \alpha_c$, то согласно формуле (21)

$$R_1 = \frac{F_{r_2}}{\cos \alpha_c} \frac{b}{a+b} = \frac{R_{1T}}{\cos \alpha_c}. \quad (27)$$

Для подшипника № 207 нормальной группы радиального зазора при минимальном значении свободного угла контакта $\alpha_c = 7,69^\circ$ и при $\alpha = \alpha_c$, по формуле (21) получим, что $R_1 = 1,01R_{1T}$. То есть сила R_1 больше силы R_{1T} всего на 1 %. Однако при увеличении угла α до предельного в данном случае значения $\alpha_{\max} = 21,8^\circ$, например при $S = 2$,

$$\begin{aligned} \frac{R_1}{R_{1T}} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha_{\max}}{\sin \alpha_c} + \frac{1}{\cos \alpha_c} \right) = \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\operatorname{tg} 21,8^\circ}{\sin 7,69^\circ} + \frac{1}{\cos 7,69^\circ} \right) = 2. \end{aligned}$$

При максимальном значении угла $\alpha_c = 14,07^\circ$ получим

$$\alpha_{\max} = \arctg(2 \cdot 2 \cdot \sin 14,07^\circ - \operatorname{tg} 14,07^\circ) = 35,82^\circ$$

и

$$\begin{aligned} \frac{R_1}{R_{1T}} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha_{\max}}{\sin \alpha_c} + \frac{1}{\cos \alpha_c} \right) = \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\operatorname{tg} 35,82^\circ}{\sin 14,07^\circ} + \frac{1}{\cos 14,07^\circ} \right) = 2. \end{aligned}$$

То есть наибольшая реакция опор в обоих случаях больше традиционно принимаемой в два раза.

Таким образом, осевая нагрузка на вал F_a достаточно сильно влияет на работоспособность шариковых радиальных однорядных подшипников. Однако при подборе подшипников по статической грузоподъемности или при проверочном расчете на статическую грузоподъемность, данное обстоятельство практически не учитывается. При расчете данных под-

шипников эквивалентная статическая нагрузка определяется по формуле $P_{or} = X_0 F_r + Y_0 F_a$, где X_0 и Y_0 — коэффициенты соответственно радиальной и осевой нагрузок. Коэффициенты X_0 и Y_0 плохо отражают влияние осевой нагрузки на нагруженность опор подшипника. Для угла контакта подшипника 0° , что характерно для шариковых радиальных однорядных подшипников, и вовсе принимается, что $P_{or} = F_r$.

Заключение

В качестве опор валов и вращающихся осей довольно часто используются шариковые радиальные подшипники. Они предназначены для восприятия в основном радиальной нагрузки. Однако данные подшипники оказываются достаточно работоспособными при действии также и осевой нагрузки. При этом степень влияния осевой нагрузки на работоспособность указанных подшипников до сих пор неизвестна. Для оценки степени влияния осевой нагрузки на работоспособность подшипников данного типа рассмотрен характер взаимодействия тел качения и колец шариковых радиальных однорядных подшипников, установленных враспор, под действием комбинированной нагрузки. При этом учитывалось, что угол контакта тел качения с кольцами зависит от радиального зазора, который имеет место у большинства подшипников данного типа.

Разработана методика определения предельной радиальной и осевой нагрузки на данные подшипники. Установлена связь между ними. Получены выражения, связывающие осевую нагрузку с неиспользованной радиальной. На конкретных примерах показано, что наибольшая реакция опор с шариковыми радиальными однорядными подшипниками при действии на вал комбинированной нагрузки, когда осевая нагрузка является предельной, может превышать в два раза аналогичную реакцию опор при действии на вал только радиальной нагрузки той же величины. Слишком большая

погрешность в определении реакций опор вала сильно снижает работоспособность подобранных для него подшипников, ускоряя их выход из строя.

При составлении расчетной схемы вала, в качестве опор которого используются шариковые радиальные подшипники, вал всегда представляется как балка на двух шарнирных опорах. Одна из опор — неподвижный шарнир, другая — подвижный шарнир. Установлено, что при действии комбинированной нагрузки данное положение является ошибочным. На самом деле обе опоры работают как неподвижные шарниры, поскольку обе воспринимают осевую нагрузку. При этом одна часть вала между опорами оказывается растянутой, а другая — сжатой. Границей между растянутой и сжатой зонами является точка приложения осевой силы.

Таким образом, осевая нагрузка на вал достаточно сильно влияет на работоспособность шариковых радиальных подшипников. При подборе подшипников по статической грузоподъемности или при проверочном расчете на статическую грузоподъемность данное обстоятельство практически не учитывается. Эквивалентная статическая нагрузка для данных подшипников определяется с помощью коэффициентов радиальной и осевой нагрузок. Эти коэффициенты не в полной мере отражают влияние осевой нагрузки на работоспособность опор подшипников. Для угла контакта тел качения с кольцами 0° , что характерно для шариковых радиальных подшипников, эквивалентная статическая нагрузка и вовсе приравнивается к радиальной.

Список литературы

1. Белоусов Ю.В., Кириловский В.В., Рекач Ф.В. Исследование влияния степени соприкосновения поверхностей качения на контактные напряжения в шариковых радиальных подшипниках // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 3. С. 213–223. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-213-223>
2. Jiaxian C, Wentao M, Yuejian Ch. Transferable health indication for rolling bearings: a new solution of cross-

working condition monitoring of degradation process // 2020 Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling; 2020 Aug 20–23; Vancouver, BC, Canada, 2020. P. 1–6. <http://doi.org/10.1109/APARM49247.2020.9209439>

3. Paulson N.R., Evans N.E., Bomidi J.A.R., Sadeghi F., Evans R.D., Mistry K.K. A finite element model for rolling contact fatigue of refurbished bearings // Tribology International. 2015. Vol. 85. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.12.006>

4. Орлов А.В. Повышение статической грузоподъемности шарикоподшипников // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 5. С. 67–70. EDN: KUIAEN

5. Полубарьев И.Н., Дворянинов И.Н., Салиев Е.Р. Экспериментальная проверка нового подхода к определению нагрузок, действующих на шариковые радиальные однорядные подшипники // Форум молодых ученых. 2017. № 9 (13). С. 591–600. EDN: ZSJYWB

6. Bogdański S., Trajer M.A. Dimensionless multi-size finite element model of a rolling contact fatigue crack // Wear. 2005. Vol. 258. Issue 7–8. P. 1265–1272. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.036>

7. Weinzapfel N., Sadeghi F., Bakolas V. A 3D finite element model for investigating effects of material microstructure on rolling contact fatigue // Tribology and Lubrication Technology. 2011. Vol. 67. Issue 1. P. 17–19.

8. Abdullah M.U., Khan Z.A., Kruhoeffler W., Blass T.A. 3D finite element model of rolling contact fatigue for evolved material response and residual stress estimation // Tribology Letters. 2020. Vol. 68. Article no. 122. <https://doi.org/10.1007/s11249-020-01359-w>

9. Golmohammadi Z., Sadeghi F.A. 3D finite element model for investigating effects of refurbishing on rolling contact fatigue // Tribology Transactions. 2020. Vol. 63. Issue 2. P. 251–264. <https://doi.org/10.1080/10402004.2019.1684606>

10. Lin H., Wu F., He G. Rolling bearing fault diagnosis using impulse feature enhancement and nonconvex regularization // Mechanical Systems and Signal Processing. 2020. Vol. 142. Article no. 106790. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106790>

11. Wang H., Du W. A new K-means singular value decomposition method based on self-adaptive matching pursuit and its application in fault diagnosis of rolling bearing weak fault // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2020. Vol. 16 (5). <https://doi.org/10.1177/1550147720920781>

12. Кириловский В.В., Белоусов Ю.В. Теоретическое обоснование новых особенностей работы подшипников качения в условиях комбинированного нагружения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22.

№ 2. С. 184–195. <https://doi.org/10.22363.2312-8143-2021-22-2-184-195>

13. Кириловский В.В., Белоусов Ю.В. Экспериментальная проверка новых особенностей работы подшипников в условиях комбинированного нагружения // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 3. С. 278–287. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-278-287>

14. Перель Л.Я., Филатов А.А. Подшипники качения : расчет, проектирование и обслуживание опор: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Машиностроение, 1992. 608 с. URL: <https://djvu.online/file/Mf8F75AEZust1> (дата обращения: 15.02.2025).

15. Vijay A, Sadeghi F. A continuum damage mechanics framework for modeling the effect of crystalline anisotropy on rolling contact fatigue // Tribology International. 2019. Vol. 140. Article no. 105845. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105845>

16. Gaikwad J.A., Gholap Y.B., Kulkarni J.V. Bearing fault detection using Thomson’s multitaper periodogram // 2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS). 2018. P. 1135–1139. <https://doi.org/10.1109/ICICCS.2018.8663183>

17. Gao Z., Lin J., Wang X., Xu X. Bearing fault detection based on empirical wavelet transform and correlated kurtosis by acoustic emission // Materials. 2017. Vol. 10. Issue 6. Article no. 571. <https://doi.org/10.3390/ma10060571>

18. Smith W.A., Randall R.B. Diagnostics using the case western reserve university data: a benchmark study // Mechanical Systems and Signal Processing. 2015. Vol. 64–65. P. 100–131. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.04.021>

19. Леликов О.П., Дунаев П.Ф. Конструирование узлов и деталей машин. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2019. 568 с. URL: <https://djvu.online/file/yR2BAHvmATGAK> (дата обращения: 15.02.2025).

References

1. Belousov YuV, Kirilovskiy VV. Investigation of the influence of the degree of contact of rolling surfaces on contact stresses in ball radial bearing. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(3):213–223/ (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-213-223>

2. Jiaxian C, Wentao M, Yuejian Ch. Transferable health indication for rolling bearings: a new solution of cross-working condition monitoring of degradation process. *2020 Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modtling*. IEEE; 2020. P. 1–6. <http://doi.org/10.1109/APARM49247.2020.9209439>

3. Paulson NR, Evans NE, Bomidi JAR, Sadeghi F, Evans RD, Mistry KK. A finite element model for rolling contact fatigue of refurbished bearings. *Tribology International*. 2015;85:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.12.006>

4. Orlov A.V. Increasing the static load capacity of ball bearing. *Journal of Machinery Manufacture and reliability*. 2009;(5):67–70. (In Russ.) EDN: KUIAEH

5. Polubaryev IN, Dvoryaninov IN, Saliev ER. Experimental verification of a new approach to the determination of the loads acting on the single-row radial ball bearings. *Forum of Young Scientists*. 2017;9(13):591–600. (In Russ.) EDN: ZSJYWB

6. Bogdański S, Trajer MA. Dimensionless multi-size finite element model of a rolling contact fatigue crack. *Wear*. 2005;258(7–8):1265–1272. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.036>

7. Weinzapfel N, Sadeghi F, Bakolas V. A 3D finite element model for investigating effects of material microstructure on rolling contact fatigue. *Tribology and Lubrication Technology*. 2011;67(1):17–19.

8. Abdullah MU, Khan ZA, Kruhoeffer W, Blass T. A 3D finite element model of rolling contact fatigue for evolved material response and residual stress estimation. *Tribology Letters*. 2020;68:122. <https://doi.org/10.1007/s11249-020-01359-w>

9. Golmohammadi Z, Sadeghi FA. 3D finite element model for investigating effects of refurbishing on rolling contact fatigue. *Tribology Transactions*. 2020;63(2):251–264. <https://doi.org/10.1080/10402004.2019.1684606>

10. Lin H, Wu F, He G. Rolling bearing fault diagnosis using impulse feature enhancement and nonconvex regularization. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020;142:106790. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106790>

11. Wang H, Du W. A new K-means singular value decomposition method based on self-adaptive matching pursuit and its application in fault diagnosis of rolling bearing weak fault. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2020;16(5). <https://doi.org/10.1177/1550147720920781>

12. Kirilovskiy VV, Belousov YuV. Theoretical substantiation of new features of rolling bearings operation under combined loading conditions. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2021;22(2):184–195. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-2-184-195>

13. Kirilovskiy VV, Belousov YuV. Experimental verification of new features of bearing operation under combined loading conditions. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(3):278–287. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-278-287>

14. Perel LYa, Filatov AA. *Rolling bearings: Calculation, design and maintenance of supports: Handbook*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1992. (In Russ.) Available from: <https://djvu.online/file/Mf8F75AEZust1> (accessed: 15.02.2025).

15. Vijay A, Sadeghi F. A continuum damage mechanics framework for modeling the effect of crystalline

anisotropy on rolling contact fatigue. *Tribology International*. 2019;140:105845. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105845>

16. Gaikwad JA, Gholap YB, Kulkarni JV. Bearing fault detection using Thomson's multitaper periodogram. *2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*; 2018 June 14–15. IEEE; 2019. P. 1135–1139. <https://doi.org/10.1109/ICCONS.2018.8663183>

17. Gao Z, Lin J, Wang X, Xu X. Bearing fault detection based on empirical wavelet transform and correlated

kurtosis by acoustic emission. *Materials*. 2017;10(6):571. <https://doi.org/10.3390/ma10060571>

18. Smith WA, Randall RB. Rolling element bearing diagnostics using the case western reserve university data: a benchmark study. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015;64–65:100–131. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.04.021>

19. Lelikov OP, Dunayev PF. *Design of machine units and parts*. Bauman Moscow State Technical University Publ.; 2019. (In Russ.) Available from: <https://djvu.online/file/yR2BAHvmATGAK> (accessed: 15.02.2025).

Сведения об авторах

Белоусов Юрий Вениаминович, кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Москва, Российская Федерация; доцент кафедры технологий строительства и конструкционных материалов, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 7102-6966, ORCID: 0000-0002-7591-8313; e-mail: juvbelousov@bmstu.ru

Шамбина Светлана Львовна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительства и конструкционных материалов, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 5568-0834, ORCID: 0000-0002-9923-176X; e-mail: shambina_sl@mail.ru

Рекач Федор Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительства и конструкционных материалов, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 5568-0834, ORCID: 0000-0002-8584-6755; e-mail: rekfedor@yandex.ru

Киреев Олег Леонидович, старший преподаватель кафедры технологий строительства и конструкционных материалов, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0002-1523-9439; e-mail: kireev_ol@pfur.ru

Bio notes:

Yuriy V. Belousov, PhD (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Fundamentals of Machine Design, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Construction Technology and Structural Materials, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 7102-6966, ORCID: 0000-0002-7591-8313; e-mail: juvbelousov@bmstu.ru

Svetlana L. Shambina, PhD (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Construction Technology and Structural Materials, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 5568-0834, ORCID: 0000-0002-9923-176X; e-mail: shambina_sl@mail.ru

Fedor V. Rekach, PhD (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Construction Technology and Structural Materials, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8591-7547, ORCID: 0000-0002-8584-6755; e-mail: rekfedor@yandex.ru

Oleg L. Kireev, Senior Lecturer of the Department of Construction Technology and Structural Materials, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0002-1523-9439; e-mail: kireev_ol@pfur.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-4-412-427

EDN: CYSZXB

Научная статья / Research article

Оптимизация управления предприятиями оборонно-промышленного комплекса с использованием нотации BPMN

А.А. Бойков^{ID}✉, О.Е. Самусенко^{ID}, Е.А. Маликов^{ID}, Е.В. Виноградов^{ID},
И.В. Шишкин^{ID}, М.Н. Ромашенко^{ID}, Д.А. Семенцов^{ID}

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ 1042200032@pfur.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 11 июля 2025 г.

Доработана: 3 сентября 2025 г.

Принята к публикации: 14 сентября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Рассмотрены вопросы оптимизации управления предприятиями оборонно-промышленного комплекса с использованием нотации BPMN. ОПК, как ключевой сектор экономики, играет важную роль в обеспечении национальной безопасности, поддержании технологического суверенитета страны и стимулировании экономического роста. Проведен анализ существующих процессов управления предприятиями оборонно-промышленного комплекса (ОПК) и выявлены основные проблемы: устаревшие технологии, отсутствие стратегического планирования, низкая инновационная и инвестиционная активность, дефицит высококвалифицированных кадров и сложности с банковским сопровождением государственного оборонного заказа. Предложена усовершенствованная BPMN-схема управления, включающая создание инновационного центра. Инновационный центр предполагается как самостоятельный федеральный институт, выполняющий функции проведения НИОКР, технологического акселератора, подготовки кадров, разработки экономических стратегий и взаимодействия с вузами, технологическими стартапами. Для оценки эффективности предложенных решений в ОПК представлены формулы Return on Innovation Investment, Technology Transfer Efficiency и показатель подготовки кадров. Подчеркивается, что использование данной схемы управления позволит значительно повысить инновационную активность предприятий ОПК, их устойчивость к внешним вызовам, ускорить разработку и внедрение современных технологий в оборонной сфере Российской Федерации.

Ключевые слова: цифровая экономика, моделирование процессов, оборонный комплекс, промышленность, ОПК, управление, эффективность предприятий

Вклад авторов

Бойков А.А. — разработка схем в нотации BPMN, написание текста, подбор литературы; Самусенко О.Е. — валидация; Маликов Е.А. — концепция исследования, написание текста, подбор литературы; Виноградов Е.В., Шишкин И.В. — сбор и обработка материалов, подготовка списка литературы; Ромашенко М.Н. — поиск законодательной информации, сбор и обработка материалов, оформление и форматирование таблиц; Семенцов Д.А. — сбор и обработка материалов, предоставление программного обеспечения. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

© Бойков А.А., Самусенко О.Е., Маликов Е.А., Виноградов Е.В., Шишкин И.В., Ромашенко М.Н., Семенцов Д.А., 2025



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

Бойков А.А., Самусенко О.Е., Маликов Е.А., Виноградов Е.В., Шишкин И.В., Ромащенко М.Н., Семенцов Д.А. Оптимизация управления предприятиями оборонно-промышленного комплекса с использованием нотации BPMN // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 4. С. 412–427. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-412-427>

Optimizing the Management of Defense Industry Enterprises Using BPMN Notation

Anton A. Boykov[✉], Oleg E. Samusenko^{id}, Evgeny A. Malikov^{id}, Evgeny V. Vinogradov^{id},
Ilya V. Shishkin^{id}, Maksim N. Romashchenko^{id}, Dmitry A. Sementsov^{id}

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ 1042200032@pfur.ru

Article history

Received: July 11, 2025

Revised: September 3, 2025

Accepted: September 14, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. The study addresses issues related to optimizing the management of defense industry enterprises using BPMN notation. The defense-industrial complex (DIC), as a key sector of the economy, plays an important role in ensuring national security, maintaining the country's technological sovereignty, and stimulating economic growth. The authors analyze existing management processes of DIC enterprises and identify the main problems: outdated technologies, lack of strategic planning, low innovation and investment activity, shortage of highly qualified personnel, and difficulties with banking support for the state defense order. The paper proposes an improved BPMN management scheme that includes the creation of an innovation center. The innovation center is envisioned as an independent federal institution performing functions such as conducting R&D, acting as a technology accelerator, training personnel, developing economic strategies, and interacting with universities and technology startups. To assess the effectiveness of the proposed solutions in the DIC, formulas for Return on Innovation Investment, Technology Transfer Efficiency, and a personnel training indicator are presented. The authors emphasize that the use of this management scheme will significantly increase the innovation activity of DIC enterprises, enhance their resilience to external challenges, and accelerate the development and implementation of modern technologies in the defense sector of the Russian Federation.

Keywords: digital economy, process modeling, defense industry, industry, MIC, management, enterprise efficiency

Authors' contribution

Boykov A.A. — development of diagrams in BPMN notation, manuscript drafting, selection of literature; Samusenko O.E. — validation; Malikov E.A. — research concept, manuscript drafting, selection of literature; Vinogradov E.V. — collection and processing of materials, preparation of the list of references; Shishkin I.V. — collection and processing of materials, preparation of the list of references; Romashchenko M.N. — search for legislative information, collection and processing of materials, design and formatting of tables; Sementsov D.A. — collection and processing of materials, provision of software. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Boykov AA, Samusenko OE, Malikov EA, Vinogradov EV, Shishkin IV, Romashchenko MN, Sementsov DA. Optimizing the management of defense industry enterprises using BPMN notation. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(4): 412–427. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-412-427>

Введение

Оборонно-промышленный комплекс (далее — ОПК) любой страны является одним из ключевых секторов экономики, в частности в условиях политической нестабильности и технологических изменений. С точки зрения управления ОПК является важнейшим элементом по обеспечению национальной безопасности, обороноспособности государства, а также в стимулировании роста национальной экономики [1; 2]. В сводном реестре ОПК Российской Федерации на 2018 г. находятся 1355 предприятий¹. В 2024 г. количество предприятий ОПК увеличилось до 6000², как минимум 500 из которых действует на территории Москвы³. В настоящий момент времени актуальное число предприятий ОПК является засекреченной информацией и не подлежит разглашению. Таким образом, проведение исследования управления сложной многофункциональной структуры, включающей научные центры, конструкторские бюро и производственные комплексы, целесообразно по причине того, что в данном секторе экономики задействовано не менее 3,8 млн человек⁴. Современный оборонно-промышленный комплекс имеет большой спектр высокотехнологичных средств производства, включая автоматизированные линии, роботизированные системы и многокоординатное оборудование, по некоторым данным, на долю предприятий ОПК приходится более 70 % наукоемкой продукции и порядка 50 % научных кадров страны [3; 4].

Цель исследования — построить схемы бизнес-процесса управления предприятиями ОПК в нотации Business Process Model and Notation

(далее — BPMN); выявить и отразить существующие сложности и проблемы в рамках текущих бизнес-процессов управления предприятиями ОПК; предложить оптимизацию и составить новую схему бизнес-процесса управления предприятиями ОПК в нотации BPMN с учетом современных реалий и цифровизации экономики; оценить эффективность предложенных решений.

1. Материалы и методы

На основе открытых источников информации и ранее проведенных научных исследований авторы статьи разработали схему бизнес-процесса управления предприятиями ОПК в нотации BPMN согласно регламентирующему документу в Российской Федерации, а именно ГОСТ Р ИСО 18828-3-2020. BPMN — метод моделирования процессов в структуре организации. Схемы или диаграммы BPMN включают в себя основные элементы методологии: события, действия, потоки и шлюзы [5–7]. Согласно Приложению D в ГОСТ Р ИСО 18828-3-2020⁵, элементы были адаптированы и представляют собой действия, задачи, события, пункты сопряжения, соединители, пулы и дорожки, а также артефакты. Адаптированные элементы подробно представлены в международном документе ИСО/МЭК 19510 (ISO/IEC 19510)⁶. Авторами приведены описание и некоторые виды элементов в таблице.

Ранее проведенные исследования в области управления предприятиями ОПК позволили составить диаграмму BPMN управления предприятием ОПК [8–13]. Схема BPMN управления предприятием ОПК представлена на рис. 1.

¹ Правительство России. Оборонно-промышленный комплекс. URL: <http://government.ru/info/32164/> (дата обращения: 15.06.2025).

² Московский Комсомолец. URL: <https://www.mk.ru/politics/2024/02/02/putin-nazval-kolichestvo-predpriyatiy-opk-v-rossii.html> (дата обращения: 15.06.2025).

³ Mos.ru. В Москве на нужды СВО работает около 500 предприятий ОПК. URL: <https://www.mos.ru/mayor/themes/11952050/> (дата обращения: 15.06.2025).

⁴ Медиахолдинг «Эксперт». Антон Алиханов: в ОПК работают 3,8 млн человек. URL: <https://expert.ru/news/anton-alikhanov-v-opk-rabotayut-3-i-8-mln-chelovek/> (дата обращения: 15.06.2025).

⁵ Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р ИСО 18828-3-2020. Москва : Стандартинформ, 2020. 49 с.

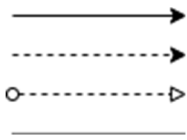
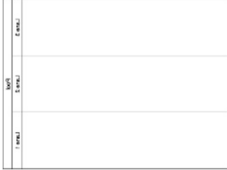
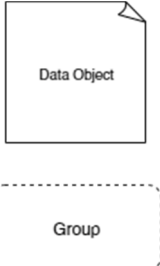
⁶ INTERNATIONAL STANDARD. ISO/IEC 19510:2013. Information technology — Object Management Group Business Process Model and Notation.

Основные элементы нотации BPMN

Элемент	Изображение	Описание
Действия		Действия связаны с рабочим заданием, которое требуется выполнить в рамках бизнес-процесса и которое может касаться решения определенной задачи или выполнения любого процесса либо подпроцесса
Задачи		Задачи представляют собой вспомогательные действия, являющиеся частью любого процесса и применяемые в тех ситуациях, когда работу в данном процессе невозможно разбить на этапы или детализировать
События		События являются ситуациями, которые запускают процесс. В рамках модели существует три типа событий: начальные, которые запускают выполнение процесса, промежуточные, которые возникают в ходе процесса, и конечные, которые завершают процесс. В BPMN-нотациях выделяют две категории событий: «захват», отвечающую за прием ссылок, и «сброс», связанную со сбросом ссылок. Начальные события всегда относятся к категории «захвата», как и промежуточные события, связанные с границами действий. Появление такого события приводит к остановке действий. Конечные события всегда принадлежат категории «сброс»
Пункты сопряжения		Пункты сопряжения представляют собой узлы принятия решений, которые служат точками разветвления при выполнении операций либо объединяют несколько потоков в один с целью ограничения информационных количества потоков. В зависимости от характера информационного потока пункты сопряжения подразделяются на два типа с разными блок-схемами: разделения или принятия решения, что соответствует разветвлению информационных потоков, их комбинации, например слияния. Для моделирования информационных потоков используют два основных типа пунктов сопряжения. Первый — эксклюзивный пункт сопряжения, который применяется для выбора одного конкретного потока из нескольких, а также для ветвления или объединения событий. Второй тип пунктов сопряжений, часто состоящий из нескольких параллельных пунктов, используется для одновременного запуска действий из нескольких информационных потоков
Соединители		В BPMN-нотациях для отображения связей между элементами процесса и самими процессами применяют набор стрелок. Поток последовательностей, поток сообщений и связи обычно изображают с помощью соединителей. Соединители часто используются для описания последовательного потока на разных этапах, позволяя указывать дополнительную информацию, такую как комментарии и их результаты в направлении связи, а также для обозначения направления обмена сообщениями между различными дорожками
Пулы и дорожки		В BPMN-нотациях пул является пространством, на котором модельер может обозначать всех участников процесса. Это обозначение может быть как обобщенным, так и более конкретным. Кроме того, с помощью пула можно назначать соответствующие задачи различным участникам, а их бизнес-взаимодействия, например межкорпоративные, связывать с информационными потоками. Дорожки представляют собой части пула, предназначенные для организации и разделения выполняемых в нем действий. Если пул ориентирован горизонтально, то разделение действий по дорожкам происходит по горизонтали. Поскольку в BPMN нет строгих правил по использованию дорожек, разработчики моделей могут применять их практически любым способом, например, основываясь на функциональных ролях руководителей и сотрудников или на организационной структуре. Кроме того, дорожки можно разбивать на так называемые «основные этапы», что позволяет получить более детальное табличное представление данных. Дополнительным преимуществом такого деления является упорядочивание объектов информационного потока, соединителей и артефактов в виде сетки
Артефакты		Чтобы сделать диаграмму более понятной, BPMN-модель можно улучшить с помощью артефактов, которые содержат дополнительную информацию. Существует три стандартных типа артефактов: информационный объект, комментарии и группы

Источники: выполнено А.А. Бойковым

Main Elements of BPMN Notation

Element	Image	Description
Activity		Activity is related to a work task that needs to be performed within a business process and may involve solving a specific problem or executing any process or subprocess
Tasks		Tasks represent auxiliary actions that are part of any process and are used in situations where the work within the process cannot be broken down into stages or detailed further
Events		Events are situations that trigger a process. Within the model, there are three types of events: start events, which initiate the execution of the process; intermediate events, which occur during the process; and end events, which conclude the process. In BPMN notations, two categories of events are distinguished: “catch,” responsible for receiving signals, and “throw,” related to sending signals. Start events always belong to the “catch” category, as do intermediate events associated with the boundaries of activities. The occurrence of such an event leads to the suspension of actions. End events always belong to the “throw” category
Gateways		Gateways represent decision nodes that serve as branching points during operations or combine multiple flows into one to limit the number of information flows. Depending on the nature of the information flow, gateways are divided into two types with different flowchart symbols: splitting or decision-making, corresponding to branching information flows, their combinations, such as merging. Two main types of gateways are used to model information flows. The first is an exclusive gateway, which is used to select one specific flow from several, as well as for branching or merging events. The second type of gateways, often consisting of several parallel gateways, is used for simultaneous triggering of actions from multiple information flows.
Connectors		In BPMN notations, a set of arrows is used to show connections between process elements and the processes themselves. Sequence flow, message flow, and associations are usually depicted using connectors. Connectors are often used to describe sequential flow at different stages, allowing additional information such as comments and their results along the connection direction, as well as indicating the direction of message exchange between different lanes
Pools and Lanes		In BPMN-notations, a pool is a space where the modeler can denote all participants of the process. This designation can be general or more specific. Furthermore, pools can be used to assign corresponding tasks to different participants and link their business interactions, for example inter-company ones, with information flows. Lanes are parts of a pool intended for organizing and separating actions performed within it. If the pool is oriented horizontally, then the division of actions by lanes occurs horizontally. Since BPMN does not have strict rules for using lanes, model developers can apply them in almost any way — for example, based on functional roles of managers and employees or on organizational structure. Additionally, lanes can be divided into so-called “main stages,” which allows obtaining a more detailed tabular representation of data. An additional advantage of such division is the ordering of objects of information flow, connectors, and artifacts in the form of a grid.
Artifacts		To make the diagram clearer, a BPMN model can be enhanced with artifacts that contain additional information. There are three standard types of artifacts: data object, annotations, and groups.

Source: by A.A. Boykov

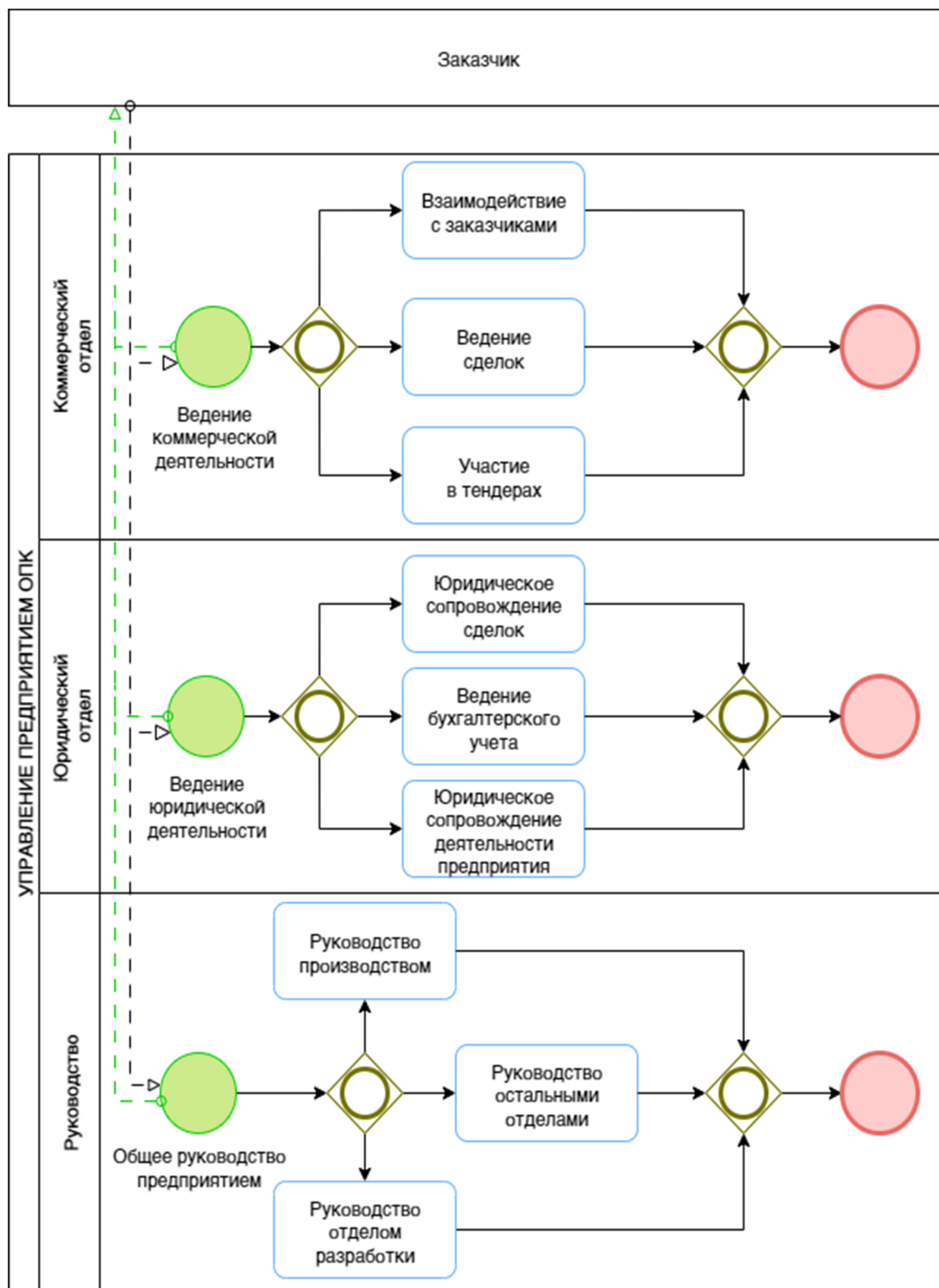


Рис. 1. Схема BPMN-управления предприятием ОПК

Источник: выполнено А.А. Бойковым

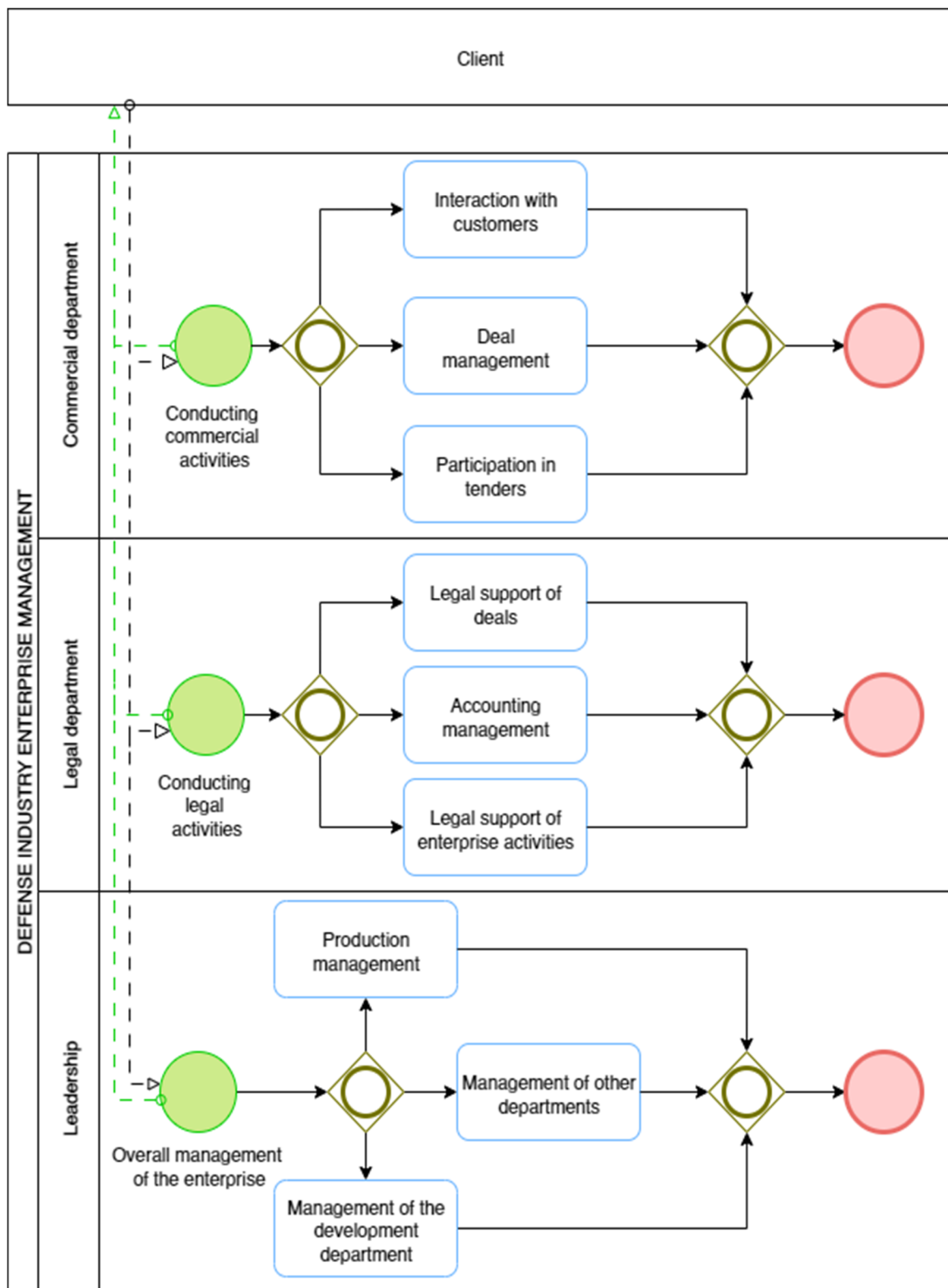


Figure 1. BPMN Diagram for Managing a Defense Industry Enterprise

Source: by A.A. Boykov

На схеме приведены ключевые элементы управления предприятием ОПК в нотации BPMN. На диаграмме представлен пул, разделенный на три дорожки, каждая из которых представляет собой отдел: коммерческий отдел, юридический отдел и руководство. Каждый отдел имеет начальное событие, действия и задачи, отражающие реальные функции того или иного отдела и завершающие событие. На диаграмме имеются пункты сопряжения типа «ИЛИ», а также соединители, представленные в виде потока последовательностей.

В рамках исследования авторами были выявлены ключевые проблемы управления предприятием ОПК [14–18]. Далее рассмотрим некоторые из них.

1. *Устаревшие технологии.* Большинство используемых технологий ориентированы на ограниченную номенклатуру изделий и не обновлялись десятилетиями — средний возраст продукции от 8 до 10 лет, а четверть продукции освоено более 25 лет назад.

2. *Отсутствие системы стратегического планирования.* Нет четких ориентиров и инструментов реализации ФЗ-172 «О стратегическом планировании»⁸. В части управления государство ориентируется в первую очередь на контроль, нежели на прогнозирование.

3. *Фрагментированное ценообразование в государственном оборонном заказе* (далее — ГОЗ). Формируется от себестоимости производителей без учета стимулирования к снижению издержек или повышению качества.

4. *Низкая инвестиционная и инновационная активность.* Отсутствуют механизмы стимулирования НИОКР и привлечения инвестиций. 98 % затрат на инновации происходит за счет собственных средств предприятий.

5. *Кадровые проблемы.* Высокий отток квалифицированных специалистов за границу, ухудшение кадрового и научно-технического потенциала.

6. *Проблемы исполнения ГОЗ и кооперации.* Срывы сроков из-за потери технологий, санкций и нарушения производственно-тех-

нологических связей, в том числе зависимость от иностранных комплектующих.

7. *Незагруженные мощности и устаревшее оборудование.* Большая часть производственных фондов морально и физически устарева, простаивают значительные мощности.

8. *Недостаточная законодательная и организационная поддержка.* Нет стимулов к переходу на контракты полного жизненного цикла, слабая правовая база для государственно-частного партнерства. Контракт полного жизненного цикла — это договор, который охватывает все стадии создания и эксплуатации продукции, а именно: НИОКР, производство, поставку, сервисное обслуживание и ремонт в ходе эксплуатации, утилизацию по завершении срока службы.

9. *Проблемы банковского сопровождения ГОЗ.* Сложности с открытием множества отдельных счетов и нехватка банковской инфраструктуры для обслуживания предприятий. По закону предприятия ОПК обязаны открывать отдельные специальные счета для расчетов по каждому госконтракту с Минобороны. Все операции по этим счетам контролируются для предотвращения нецелевого расходования средств (это введено после ряда коррупционных скандалов).

10. *Ограниченная номенклатура и слабая диверсификация производства.* Основной потребитель — государство. Слабая конверсия для выпуска гражданской продукции ограничивает устойчивость ОПК.

Следует отметить, что в период с 2022 г. некоторые описанные выше проблемы начали решаться в связи с поступлением больших инвестиций в ОПК, в том числе со стороны частных инвесторов [19; 20]. Авторами исследования дополнительно было изучено управление предприятиями ОПК за рубежом: в США, Китае, НАТО [21–28]. Таким образом, в США практикуется концепция Modular Open Systems Approach (далее — MOSA), в Китае — государственная программа Military — Civil Fusion (далее — MCF), а НАТО развивает открытую

⁸ Федеральный закон «О стратегическом планировании в Российской Федерации» от 28.06.2014 № 172-ФЗ.

архитектуру, например Future Combat Air System (далее — FCAS), а также проект Defence Innovation Accelerator for the North Atlantic (далее — DIANA). Концепция MOSA направлена на создание вооруженных систем с открытой архитектурой и модульной структурой, позволяющей обновлять и заменять отдельные компоненты без необходимости полной перестройки всей системы. MCF основывается на глубокой интеграции гражданского и военного секторов с целью ускоренного технологического развития. MCF позволяет максимально быстро адаптировать достижения гражданских компаний в области искусственного интеллекта, квантовых технологий и спутниковых систем для нужд Народно-освободительной армии Китая. Благодаря созданию специализированных зон двойного назначения, где сосредоточены предприятия, научные институты и государственные организации, Китай формирует единую инновационную экосистему и сокращает затраты на исследования и разработки. DIANA и European Open Systems Approach направлены на вовлечение стартапов, научных центров и коммерческих предприятий в развитие военных технологий и поддержку инноваций, однако, в отличие от китайского MCF, эти меры не предполагают масштабной гражданско-военной интеграции из-за высоких стандартов конфиденциальности и сложного правового регулирования.

Открытые архитектуры применяются в НАТО прежде всего для того, чтобы объединять усилия разных стран, упрощать совместные закупки и повышать эффективность взаимодействия между вооруженными силами государств-членов. Таким образом, американская модель MOSA обеспечивает гибкость и конкурентоспособность, китайская MCF концентрируется на слиянии гражданского и военного потенциала для ускоренного наращивания мощи, а инициативы НАТО служат для координации международных усилий и повышения технологической совместимости.

На основании изученных материалов, а также выявленных ошибок авторами исследова-

ния была составлена усовершенствованная диаграмма управления предприятием ОПК в нотации BPMN. Усовершенствованная диаграмма управления предприятием ОПК в нотации BPMN представлена на рис. 2.

Таким образом, авторами статьи предложено усовершенствование общей модели управления предприятиями ОПК посредством создания унифицированного федерального оборонного инновационного центра (далее — УФОИЦ), который осуществлял бы взаимодействие с государственными и частными заказчиками, предприятиями ОПК, в том числе научно-исследовательскими, выполнял функции НИОКР, технологического акселератора, аккумулировал бы взаимодействие с высшими учебными заведениями, а также с технологическими стартапами. Также в функции УФОИЦ могла бы входить разработка экономических стратегий, законодательных актов, подготовка кадров, изучение конъюнктуры оборонного рынка и геополитической обстановки в мире. УФОИЦ не должен быть полностью подчинен Минобороны Российской Федерации в связи с существующими проблемами в управлении предприятиями ОПК.

По мнению авторов статьи, УФОИЦ может быть частично подчинен Минобороны Российской Федерации для получения экспертного мнения в области обороны и оборонной промышленности, однако сама структура УФОИЦ должна быть независимой и состоять из экспертов в соответствующих областях геополитики, экономики, промышленности и науки или иметь причастность к существующим отечественным научно-исследовательским или коммерческим структурам в соответствующих областях. Альтернативным вариантом может быть полная подчиненность УФОИЦ федеральному органу исполнительной власти (за исключением Минобороны Российской Федерации), в том числе вновь созданному, или Правительству Российской Федерации. Другим вариантом является подчинение конституционному государственному совещательному органу при Президенте Российской Федерации, в том числе вновь созданному.

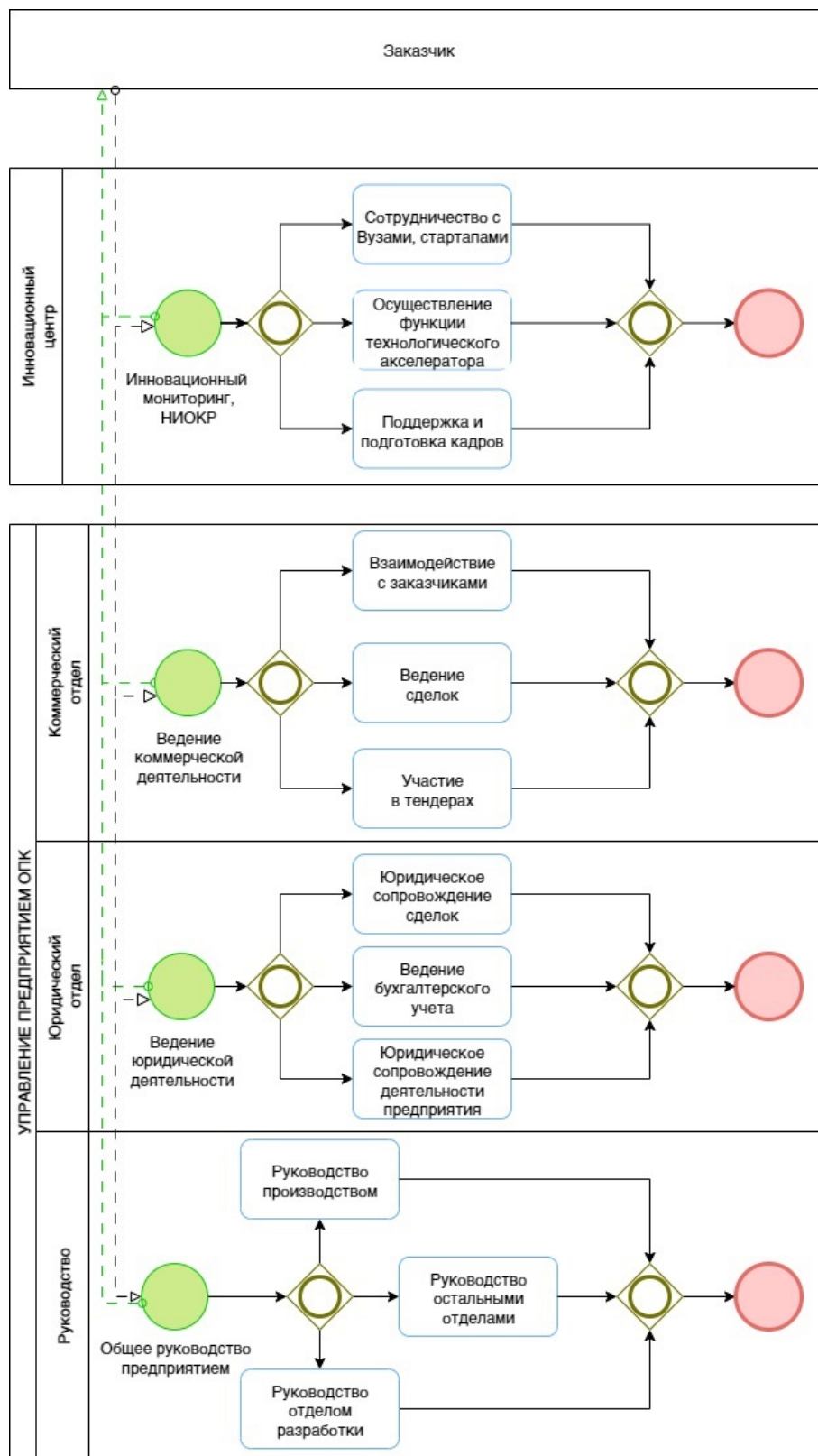


Рис. 2. Усовершенствованная диаграмма BPMN-управления предприятием ОПК

Источник: выполнено А.А. Бойковым

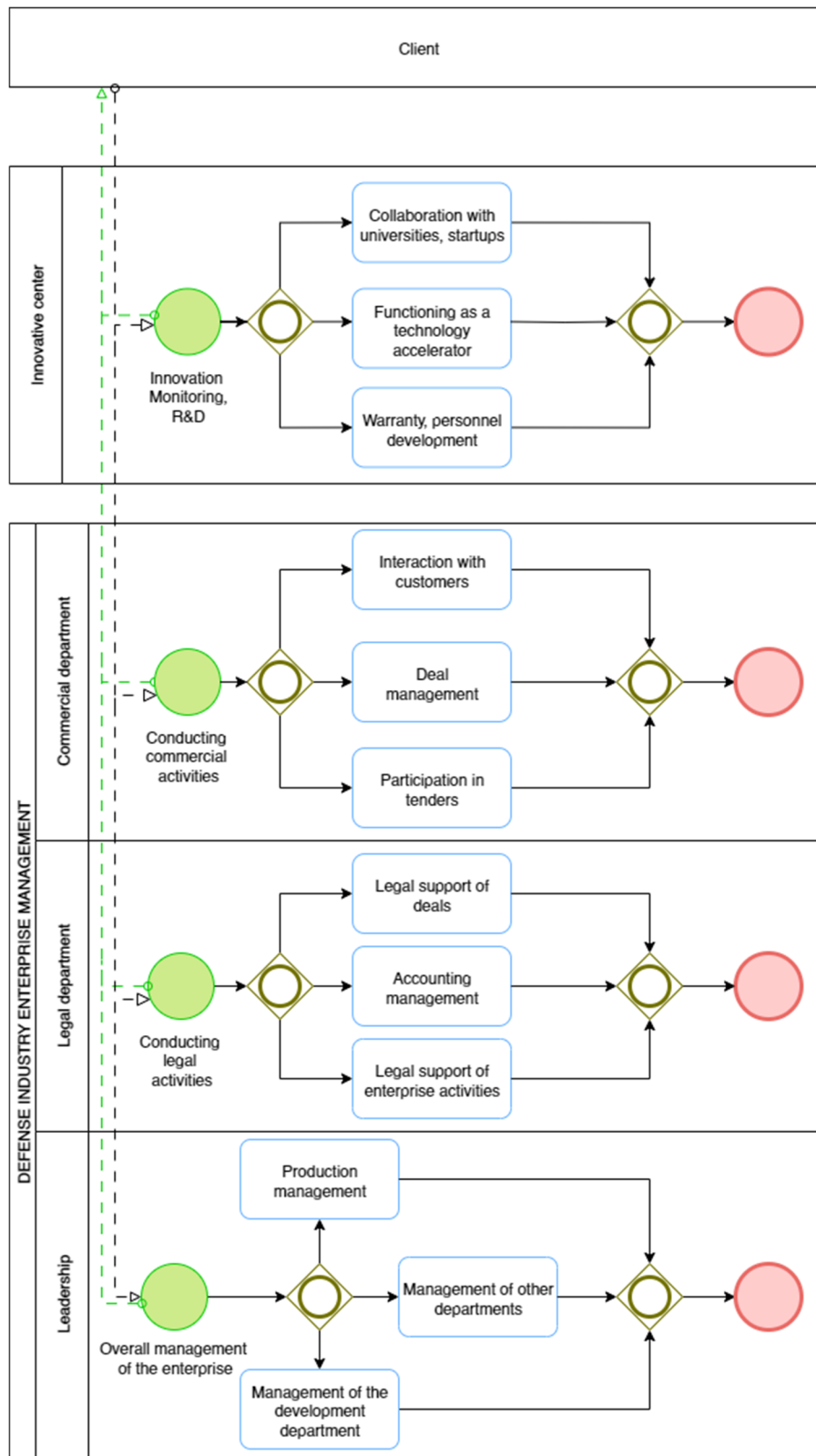


Figure 2. Enhanced BPMN diagram for managing a defense industry enterprise

Source: made by A.A. Boykov

Для расчета потенциальной эффективности УФОИЦ можно использовать модифицированный показатель Return on Innovation Investment (ROI) по формуле

$$ROI = \frac{V - C}{C} 100\%,$$

где V — оценка добавленной стоимости в денежном эквиваленте (в рублях или другой валюте), созданной центром, например, сумма экономического эффекта от внедренных НИОКР, патентов, сокращения времени разработки новых образцов вооружения; C — общие затраты на содержание центра в денежном эквиваленте (в рублях или другой валюте) на финансирование, административные издержки, зарплаты.

Удовлетворительным будет считаться показатель ROI, равный 20–30 %.

Для расчета реальной количественной оценки пользы можно применить индекс Technology Transfer Efficiency (TTE) по формуле

$$TTE = \frac{N \times P \times W}{T},$$

где N — число технологий или проведенных НИОКР за период (в штуках); P — коэффициент успешного внедрения: доля технологий, реально использованных в ОПК или переданных промышленности. Рассчитывается как доля разработок, которые реально внедрены в производство или переданы предприятиям ОПК:

$$P = \frac{N_{\text{ВН}}}{N},$$

где $N_{\text{ВН}}$ — число внедренных технологий в предприятия ОПК (в штуках); W — средневзвешенный коэффициент значимости технологий, учитывающий военный, экономический и социальный эффект. Каждой технологии присваивается вес, например, от 1 до 5 в зависимости от ее военной, экономической или научной ценности. Вес можно нормировать по экспертной шкале; T — среднее время от идеи до внедрения (в годах).

Чем выше получившийся показатель TTE, тем выше эффективность УФОИЦ. Удовлетво-

рительным результатом будет считаться показатель TTE не менее 5.

Для расчета эффективности подготовки кадров возможно применить формулу

$$E = \frac{N \times Q}{C},$$

где N — число подготовленных специалистов за период (в штуках); Q — коэффициент квалификации, например, % выпускников, успешно трудоустроенных в ОПК (в процентах). Рассчитывается как доля выпускников, которые успешно трудоустроились в предприятия ОПК или получили повышение квалификации:

$$Q = \frac{N_T}{N},$$

где N_T — число трудоустроенных выпускников в предприятия ОПК за период (в штуках); C — затраты на подготовку кадров в денежном эквиваленте (в рублях или другой валюте). Удовлетворительным результатом будет считаться показатель E , равный от 1,2 до 1,5 в зависимости от количества затрат в денежном эквиваленте.

2. Результаты и обсуждение

Результатом исследования являются разработанные диаграммы процессов управления предприятиями ОПК в нотации BPMN. Также были выявлены основные проблемы управления предприятиями ОПК. Диаграммы выполнены с помощью программного обеспечения draw.io.

Разработанные компактные схемы в нотации BPMN позволяют рассмотреть процесс управления предприятиями ОПК в общем виде, однако предложенные схемы имеют общий характер и могут не подойти для некоторых узкоспециализированных предприятий ОПК. Данные схемы могут являться отправной точкой для создания более детализированных диаграмм в нотации BPMN, для предложения альтернативных решений с целью борьбы с существующими проблемами в сфере управления предприятиями ОПК.

Заключение

Диаграммы BPMN разработаны с учетом регламентирующих документов на территории Российской Федерации и имеют высокую степень интеграции в существующие нормативные акты. Использование диаграмм на практике может оказать влияние на динамику роста показателей предприятий ОПК, скорость создания новых инновационных вооружений и оборонных технологий.

Список литературы

1. Глазков К.П. Роль оборонно-промышленного комплекса в экономике государства на примере ведущих стран мира // Материалы Научно-практической конференции с международным участием «Управление в сфере науки, образования и технологического развития», Москва, 21–22 апреля 2016 года. Москва : Московский Политех, 2016. С. 146–149. EDN: XFFWIV
2. Pedah F.H., Deksino G.R., Putra A.I., Yanto S., Luntungan A.H.O. The important role of the defense industry in supporting national defense // *East Asian Journal of Multi-disciplinary Research*. 2025. Vol. 4. No. 3. P. 1401–1416. <https://doi.org/10.55927/eajmr.v4i3.89>
3. Потянова М.А., Кобылина Е.В. Тенденция развития оборонно-промышленного комплекса (ОПК) Российской Федерации в современных условиях // Актуальные вопросы современной науки и образования : сб. науч. статей по материалам Всерос. конф. в рамках проведения XXIII науч.-практ. чтений, посв. памяти философа и общественного деятеля А.Н. Радищева, приуроченных к Году педагога и наставника, Малоярославец, 14 апреля 2023 года. Малоярославец : Московский финансово-юридический уни-верситет МФЮА, 2023. С. 252–256. EDN: EUPDTZ
4. Кохно П.А. Менеджмент оборонно-промышленного комплекса как основа национальной стратегии промышленного развития // *Экономика высокотехнологичных производств*. 2022. Т. 3. № 2. С. 95–112. <https://doi.org/10.18334/evp.3.2.115239>
5. De Leoni M., Felli P., Montali M. Integrating BPMN and DMN: modeling and analysis // *Journal on Data Semantics*. 2021. Vol. 10. No. 1. P. 165–188. <https://doi.org/10.1007/s13740-021-00132-z>
6. De Giacomo G., Dumas M., Maggi F.M., Montali M. Declarative process modeling in BPMN // *Lecture Notes in Computer Science*. 2015. Vol. 9097. P. 84–100. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19069-3_6 EDN: YVQYRH
7. Габов Н.А. Моделирование бизнес-процессов в нотации BPMN // *Инноватика–2023 : сборник мате-*

риалов XIX Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 21–22 апреля 2023 года / под редакцией С.Л. Минькова. Томск : Общество с ограниченной ответственностью «СТТ», 2023. С. 258–260. EDN: DOWTXB

8. Бардулин Е.Н., Зиненко А.С. Теоретические аспекты управления в организационных системах оборонно-промышленного комплекса // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. 2022. Т. 11. № 3 (59). С. 64–68. <https://doi.org/10.46548/21vek-2022-1159-0010b> EDN: ENCWWY

9. Есаулов В.Н. Некоторые аспекты работы оборонно-промышленного комплекса (ОПК) России. Германия, Саарбрюккен : Lambert Academic Publishing, 2016. 109 с. ISBN 978-3-659-97610-0 EDN: YKFMUD

10. Иванова И.А., Мозжилкина Д.А. К вопросу об управлении оборонно-промышленным комплексом Российской Федерации — приведение к актуальному состоянию // *Транспортное дело России*. 2022. № 5. С. 31–33. https://doi.org/10.52375/20728689_2022_5_31 EDN: DALOWX

11. Макриденко Л.А., Степанов А.А. Концептуальные основы управления предприятиями оборонно-промышленного комплекса // *Радиопромышленность*. 2005. № 1. С. 19–26. EDN: GYAVGC

12. Батьковский А.М., Батьковский М.А. Теоретические основы и инструментарий управления предприятиями оборонно-промышленного комплекса. Москва : Тезарус, 2015. 128 с. ISBN 978-5-98421-308-0 EDN: VMHYN

13. Батьковский А.М., Батьковский М.А., Смирнов Р.О., Фомина А.В. Принципы управления предприятиями оборонно-промышленного комплекса // *Вопросы радиоэлектроники*. 2016. № 10. С. 121–135. EDN: WMFDSJ

14. Комаров К.В. Основные проблемы управления предприятиями оборонно-промышленного комплекса // *Инновации и инвестиции*. 2023. № 9. С. 389–392. EDN: UFULYL

15. Чеботарев С.С., Ельшин В.А. Проблемы экономической безопасности в оборонно-промышленном комплексе // *На страже экономики*. 2022. № 2 (21). С. 79–86. <https://doi.org/10.36511/2588-0071-2022-2-79-86> EDN: ZXWRXG

16. Кирсанова М.А. Проблема управления технологическим обеспечением производства предприятий оборонно-промышленного комплекса // *Вопросы экономических наук*. 2009. № 5 (38). С. 33–36. EDN: KZEWSF

17. Орловская М.А., Новицкая Л.Ю. Финансовый контроль в сфере государственного оборонного заказа // *Российский научный вестник*. 2025. № 1. С. 237–242. <https://doi.org/10.24412/2782-3830-2025-1-237-242> EDN: DSEUGS

18. *Ширенин Р.П.* Финансовый контроль как составная часть государственного финансового контроля в сфере государственного оборонного заказа // Современные тенденции развития фундаментальных и прикладных наук : материалы VIII Всероссийской научно-практической конф., Брянск, 25 января 2025 года. Брянск : Брянский государственный инженерно-технологический университет, 2025. С. 389–397. EDN: ХОСРСУ

19. *Белокрылов К.А., Белокрылова О.С.* Санкционно-мобилизационные особенности современной экономики России // Научные труды Вольного экономического общества России. 2025. Т. 251. № 1. С. 376–396. <https://doi.org/10.38197/2072-2060-2025-251-1-376-396> EDN: JJDAJK

20. *Алиев Р.И.* К вопросу о мерах государственной поддержки инвесторов в сфере оборонно-промышленного комплекса // Образование и право. 2025. № 1. С. 199–203. EDN: RQYNUZ

21. *Hallberg N.L.* Exploring the development of heterogeneous contracting capabilities: The role of organizational design // Strategic Organization. 2024. P. 1–33. <https://doi.org/10.1177/14761270241244998> EDN: BRAUGK

22. *Zehtab S.B., Hong T.S.* Modular open systems approaches: empowering dod’s intellectual property cadre to evaluate department of defense programs // Public Contract Law Journal. 2024. Vol. 54. № 1. P. 41–84. URL: <https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Aged%3A9%3A312697/detailv2?> (accessed: 12.05.2025).

23. *Dew N., Lewis I.* US Defense Innovation and Industrial Policy: An Assessment of Where Things Currently Stand // Expeditions with MCUP. 2024. Vol. 2024. No. 1. P. 1–25. <https://doi.org/10.36304/ExpwMCUP.2024.05> EDN: DYBEDW

24. *Dew N., Lewis I.* System-on-system competition in defense innovation // Expeditions with MCUP. 2022. Vol. 2022. No. 1. P. 1–71. <https://doi.org/10.36304/expwmcup.2022.07> EDN: PQLQGB

25. *Pedersen O., Jahre M., Norrman A.* A balancing act: towards a conceptual framework for the governance of buyer-supplier relationships in defence supply chains // Scandinavian Journal of Military Studies. 2025. Vol. 8. No. 1. P. 152–177. <https://doi.org/10.31374/sjms.354>

26. *Yang X., Zhang H.* China’s civil-military integration and regional defence innovation: A quasi-natural experiment based on national industrial zone policy // Defence and Peace Economics. 2024. Vol. 36. No. 2. P. 1–30. <https://doi.org/10.1080/10242694.2024.2403425>

27. *Wang S., Xia M., Shi X., Hou B., Lu Sh.* China’s distinctive civil-military integration policy and firm innovation // Science and Public Policy. 2024. Vol. 51. No. 5. P. 761–779. <https://doi.org/10.1093/scipol/scae013>

28. *Farrow A.E.* Modernization and the military-civil fusion strategy // Journal of Indo-Pacific Affairs. 2023. Vol. 6. No. 6. P. 102–114. URL: <https://www.airuniversity.af.edu/JIPA/Display/Article/3533572/modernization-and-the-military-civil-fusion-strategy/> (accessed: 12.05.2025).

References

1. Glazkov KP. The role of the defense-industrial complex in the state economy on the example of leading countries of the world. *Proceedings of the Scientific and Practical Conference with International Participation “Management in the Sphere of Science, Education and Technological Development.”* Moscow: Moscow Polytechnic; 2016. p. 146–149. (In Russ.) EDN: XFFWIV

2. Pedah FH, Deksino GR, Putra AI, Yanto S, Luntungan AHO. The important role of the defense industry in supporting national defense. *East Asian Journal of Multidisciplinary Research*. 2025;4(3):1401–1416. <https://doi.org/10.55927/eajmr.v4i3.89>

3. Potyanova MA, Kobylina EV. Trend of development of the defense-industrial complex (DIC) of the Russian Federation in modern conditions. *Actual Issues of Modern Science and Education: Collection of Scientific Articles Based on Materials of the All-Russian Conference within the XXIII Scientific and Practical Readings Dedicated to the Memory of Philosopher and Public Figure A.N. Radishchev, Timed to the Year of Teacher and Mentor. Maloyaroslavets, April 14, 2023.* Maloyaroslavets: Moscow Financial and Legal University MFUA, 2023. P. 252–256. (In Russ.) EDN: EUPDTZ

4. Kokhno PA. Management of the military-industrial complex as the basis of the national industrial development strategy. *Economy of High-Tech Production*. 2022;3(2):95–112. (In Russ.) <https://doi.org/10.18334/evp.3.2.115239> EDN: PNCYHA

5. De Leoni M, Felli P, Montali M. Integrating BPMN and DMN: Modeling and analysis. *Journal on Data Semantics*. 2021;10(1):165–188. <https://doi.org/10.1007/s13740-021-00132-z>

6. De Giacomo G, Dumas M, Maggi FM, Montali M. Declarative process modeling in BPMN. *Lecture Notes in Computer Science*. 2015;9097:84–100. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19069-3_6 EDN: YVQYRH

7. Gabov NA. Business process modeling in BPMN notation. *Innovatika-2023: Collection of Materials of the XIX International School-Conference for Students, Postgraduates and Young Scientists*, Tomsk, April 21–22, 2023. Edited by S.L. Minkov. Tomsk: LLC “STT,” 2023. P. 258–260. (In Russ.) EDN: DOWTXB

8. Bardulin EN, Zinenko AS. Theoretical aspects of management in organizational systems of the defense-industrial complex. *XXI Century: Results of the Past and Problems of the Present Plus*. 2022;11(3):64–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.46548/21vek-2022-1159-0010> EDN: ENCWWY

9. Esaulov VN. *Some aspects of the work of the Russian defense-industrial complex (DIC)*. Saarbrücken, Germany: Lambert Academic Publ.; 2016. (In Russ.) ISBN 978-3-659-97610-0 EDN: YKFMUD.

10. Ivanova IA, Mozhilkina DA. On the issue of management of the defense-industrial complex of the Russian Federation — Bringing to the current state. *Transport Busi-*

ness of Russia. 2022;(5):31–33. (In Russ.) https://doi.org/10.52375/2072868920225_31 EDN: DALOWX

11. Makridenko LA, Stepanov AA. Conceptual foundations of management of defense-industrial complex enterprises. *Radio Industry*. 2005;(1):19–26. EDN: GYAVGC

12. Batkovsky AM, Batkovsky MA. *Theoretical foundations and tools for managing defense-industrial complex enterprises*. Moscow: Thesaurus Publ.; 2015. (In Russ.) ISBN 978-5-98421-308-0 EDN: VMIHYH

13. Batkovsky AM, Batkovsky MA, Smirnov RO, Fomina AV. Principles of management of defense-industrial complex enterprises. *Questions of Radio Electronics*. 2016;(10):121–135. (In Russ.) EDN: WMFDSJ

14. Komarov KV. Main problems of managing defense-industrial complex enterprises. *Innovations and Investments*. 2023;(9):389–392. (In Russ.) EDN: UFULYL

15. Kirsanova MA. Problem of Managing Technological support of production at defense-industrial complex enterprises. *Economic Sciences Issues*. 2009;5(38):33–36. EDN: KZEWSF

16. Chebotarev SS, Elshin VA. Problems of economic security in the defense-industrial complex. *On Guard of Economy*. 2022;2(21):79–86. (In Russ.) <https://doi.org/10.36511/2588-0071-2022-2-79-86> EDN: ZXWRXG

17. Orlovskaya MA, Novitskaya LYu. Financial control in the sphere of state defense order. *Russian Scientific Bulletin*. 2025;(1):237–242. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2782-3830-2025-1-237-242> EDN: DSEUGS

18. Shirenin RP. Financial Control as an integral part of state financial control in the sphere of state defense order. *Modern Trends in Fundamental and Applied Sciences Development: Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference*. Bryansk, January 25, 2025. Bryansk: Bryansk State Engineering and Technology University, 2025. P. 389–397. (In Russ.) EDN: XOCPCU

19. Belokrylov KA, Belokrylova OS. Sanction-Mobilization Features of the Modern Russian Economy. *Scientific Works of the Free Economic Society of Russia*. 2025;251(1):376–396. (In Russ.) <https://doi.org/10.38197/2072-2060-2025-251-1-376-396> EDN: JJDAJK

20. Aliev RI. On measures of state support for investors in the defense-industrial complex sphere. *Education and Law*. 2025;(1):199–203. (In Russ.) EDN: RQYNUZ

21. Hallberg NL. Exploring the development of heterogeneous contracting capabilities: The role of organizational design. *Strategic Organization*. 2024;1–33. <https://doi.org/10.1177/14761270241244> EDN: BRAUGK

22. Zehtab SB, Hong TS. Modular open systems approaches: Empowering DoD's intellectual property cadre to evaluate department of defense programs. *Public Contract Law Journal*. 2024;54(1):41–84. Available from: [https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Aagd%3A9%3A312697/det](https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Aagd%3A9%3A312697/detailv2?) ailtv2? (accessed: 12.05.2025).

23. Dew N, Lewis I. US Defense innovation and industrial policy: An assessment of where things currently stand. *Expeditions with MCUP*. 2024;2024(1):1–25. <https://doi.org/10.36304/ExpwMCUP.2024.05> EDN: DYBEDW

24. Dew N, Lewis I. System-on-system competition in defense innovation. *Expeditions with MCUP*. 2022;2022(1):1–71. <https://doi.org/10.36304/expwmcup.2022.07> EDN: PQLQGB

25. Pedersen O, Jahre M., Norrman A. A Balancing Act: Towards a Conceptual Framework for the Governance of Buyer-Supplier Relationships in Defence Supply Chains. *Scandinavian Journal of Military Studies*. 2025;8(1):152–177. <https://doi.org/10.31374/sjms.354>

26. Yang X, Zhang H. China's Civil-Military Integration and Regional Defence Innovation: A Quasi-Natural Experiment Based on National Industrial Zone Policy. *Defence and Peace Economics*. 2024;36(2):1–30. <https://doi.org/10.1080/10242694.2024.2403425>

27. Wang S, Xia M, Shi X, Hou B, Lu Sh. China's Distinctive Civil-Military Integration Policy and Firm Innovation. *Science and Public Policy*. 2024;51(5):761–779. <https://doi.org/10.1093/scipol/scae013>

28. Farrow AE. Modernization and the Military-Civil Fusion Strategy. *Journal of Indo-Pacific Affairs*. 2023;6(6):102–114. Available from: <https://www.airuniversity.af.edu/JIPA/Display/Article/3533572/modernization-and-the-military-civil-fusion-strategy/> (accessed: 12.05.2025).

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

Самусенко Олег Евгеньевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация; 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 6613-5152, ORCID: 0000-0002-8350-9384; e-mail: samusenko@rudn.ru

Маликов Евгений Александрович, аспирант кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0004-8656-9341; e-mail: 1142221133@pfur.ru

Виноградов Евгений Владимирович, аспирант кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0004-3508-9655; e-mail: 1142221026@pfur.ru

Шишкин Илья Викторович, аспирант кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0004-9681-3176; e-mail: 1142230115@pfur.ru

Ромашченко 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

Семенов Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0001-5889-8277; e-mail: 1142220732@pfur.ru

About the authors

Anton A. Boykov, Graduate 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

Oleg E. Samusenko, Ph.D of Technical Sciences, Head of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 6613-5152, ORCID: 0000-0002-8350-9384; e-mail: samusenko@rudn.ru

Evgeny A. Malikov, Graduate student of the Department nnovation Management in Industrial Sectors, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-8656-9341; e-mail: 1142221133@pfur.ru

Evgeny V. Vinogradov, Graduate student of the Department Innovation Management in Industrial Sectors, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-3508-9655; e-mail: 1142221026@pfur.ru

Ilya V. Shishkin, Graduate student of the Department Innovation Management in Industrial Sectors, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-9681-3176; e-mail: 1142230115@pfur.ru

Maksim N. Romashchenko, Graduate 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

Dmitry A. Sementsov, Graduate student of the Department Innovation Management in Industrial Sectors, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0001-5889-8277; e-mail: 1142220732@pfur.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-4-428-446

EDN: BLDKNH

Научная статья / Research article

Синтез дискретного оптимального многомерного регулятора по неполным данным: многомерный спектральный подход

И.Г. Сидоров

Московский технический университет связи и информатики, Москва, Российская Федерация

✉ igor8i2016@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 30 мая 2025 г.

Доработана: 3 августа 2024 г.

Принята к публикации: 7 сентября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Рассмотрена минимаксная постановка задачи линейного стационарного управления по неполным данным многомерными стационарными в широком смысле случайными процессами (векторного полезного сигнала), наблюдаемого в аддитивной смеси с помехой типа «белый шум», когда спектральные плотности возмущений в канале измерений и в помехе измерений полностью неизвестны и принадлежат к некоторому множеству Ξ неотрицательно определенных функций. На наблюдаемый векторный процесс налагается лишь условие линейной регулярности. Рассмотрена гарантирующая оценка, под которой понимается наилучшая оценка параметров полезного сигнала в смысле минимума среднеквадратической ошибки при наихудшем поведении ошибок измерений и возмущений со спектральными плотностями, принадлежащими множеству Ξ , по отношению к которой определяется оптимальное управление по неполным данным. Относительно спектральной плотности полезного сигнала известно лишь, что она удовлетворяет заданной системе моментных условий и сосредоточена на заданном измеримом подмножестве оси частот. Показано, что факторизация матричной спектральной плотности позволяет получить решение задачи оптимальной минимаксной линейной фильтрации и необходима для решения задачи линейного оптимального управления по неполным данным. Отыскание оптимального управления по неполным данным у возникающей многомерной антагонистической игры сводится к решению некоторой системы соотношений. При решении использованы методы матричных краевых задач, матричные преобразования Гильберта и свойства матричных частотных характеристик. Приведен иллюстрирующий пример.

Ключевые слова: факторизация, многомерный, стационарный, векторный случайный процесс, минимаксный линейный фильтр, неопределенность, матричная спектральная плотность, гарантирующая матричная частотная характеристика, управление, седловая точка

Для цитирования

Сидоров И.Г. Синтез дискретного оптимального многомерного регулятора по неполным данным: многомерный спектральный подход // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 4. С. 428–446. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-428-446>

© Сидоров И.Г., 2025



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

Synthesis of a Discrete Optimal Multidimensional Controller Based on Incomplete Data: Multidimensional Spectral Approach

Igor G. Sidorov 

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

✉ igor8i2016@yandex.ru

Article history

Received: May 30, 2025

Revised: August 3, 2025

Accepted: September 7, 2025

Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Abstract. The minimax formulation of the problem of linear stationary control based on incomplete data of multidimensional stationary in a broad sense random processes (vector useful signal) observed in an additive mixture with interference of the “white noise” type, when the spectral densities of disturbances in the measurement channel and in the measurement interference are completely unknown and belong to a certain set of non-negatively defined functions, is considered. Only the condition of linear regularity is imposed on the observed vector process. A guaranteeing estimate is considered, which means the best estimate of the parameters of a useful signal in the sense of a minimum standard error with the worst behavior of measurement errors and disturbances with spectral densities belonging to the set, with respect to which the optimal control is determined based on incomplete data. Regarding the spectral density of the useful signal, it is only known that it satisfies a given system of moment conditions and is concentrated on a given measurable subset of the frequency axis. It is shown that the factorization of the matrix spectral density makes it possible to obtain a solution to the problem of optimal minimax linear filtration and is necessary to solve the problem of linear optimal control based on incomplete data. The search for optimal control based on incomplete data from the emerging multidimensional antagonistic game is reduced to solving a specific system of relations. Matrix boundary value problem methods, Hilbert matrix transformations, and properties of matrix frequency characteristics are used in the solution. An illustrative example is presented.

Keywords: factorization, multidimensional, stationary, vector random process, minimax linear filter, uncertainty, matrix spectral density, guaranteeing matrix frequency response, control, saddle point

For citation

Sidorov IG. Synthesis of a discrete optimal multidimensional controller based on incomplete data: Multidimensional spectral approach. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(4):428–446. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-428-446>

Введение

Задача управления и оценивания марковских процессов по наблюдениям за другим, связанным с ним процессом находилась в центре внимания исследователей многие годы [1–13]. Обсуждена общая формулировка этой задачи для случая линейных систем с постоянными параметрами, а также в частотном синтезе адаптивного оптимального управления для частично наблюдаемых стохастических систем на случай произвольного конечного числа ограничений на спектральную плотность векторного возмущения и ошибок измерения, присутствующих в канале наблюдения векторного полезного сигнала. Проблематика рассматриваемой

задачи тесно связана с факторизацией матричной спектральной плотности (МСП), которая возникает в задачах оптимальной стационарной линейной фильтрации и оптимального линейного управления [1–2; 9; 13]. В исследовании (раздел 2) показано, что факторизация МСП необходима и для решения задачи оптимального линейного управления многомерными стационарными случайными процессами в условиях неопределенности их спектральных плотностей, она также возникает в теории минимаксной линейной фильтрации стационарных процессов [14]. В рамках теории линейной фильтрации и в ее терминах проблема факторизации равноценна отысканию формирующего и отбеливающего фильтра и в конечном счете

переходу от исходного наблюдаемого процесса к эквивалентному ему белому шуму, называемому фундаментальным процессом. Близкой к задаче факторизации МСП является проблема факторизации матричной передаточной функции (МПФ), возникающая в H^∞ теории управления [2–12; 15]. Заметим, что задача факторизации применительно к рациональным МСП решена полностью в [16], в частности, в последние десятилетия особое внимание уделяется методам построения таких систем, математические модели которых представляются элементами с минимальными нормами в пространствах Харди, в [18] рассмотрен частотный метод синтеза оптимальных регуляторов для линейных систем со скалярным возмущением на множестве рациональных функций. Однако важным является получение решения задачи оптимального линейного управления с факторизацией именно для процессов с нерациональными спектрами, т. е. в конечном счете в общем случае. Заметим, что задача линейной фильтрации процессов при рациональных спектрах существенно перекрывается теорией Калмана — Бьюси [28], и потому для общего решения задачи линейной фильтрации многомерных стационарных случайных процессов требуется факторизация в общем случае необязательно рациональных МСП. В [19–20] было получено решение задачи факторизации спектральной плотности с использованием преобразования Гильберта для фильтров с непрерывным [19] и дискретным [20] временем. Задача факторизации МСП для многомерных процессов с непрерывным временем была рассмотрена в [21]. В [15] для решения задачи факторизации МСП было предложено использовать математический аппарат теории граничных значений аналитических функций [22–24] и теории краевых задач [25; 26].

В отличие от универсального подхода, основанного на решении уравнений Риккати [1; 22], предлагаемый ниже метод использует спектральные особенности синтезируемых систем, позволяя существенно упростить анализ и поиск линейного оптимального управления по неполным данным. В [9] указана возможность син-

теза минимаксного управления процессом в линейной неопределенно-стохастической системе с неполными данными, где постоянные интенсивности шумов в уравнениях состояния и наблюдения заданы лишь с точностью до принадлежности некоторым известным множествам. Использование спектрального подхода для задач с одним управлением позволяет существенно упростить анализ и синтез оптимальных решений по сравнению с методами «2-Риккати» и LMI [17]. Такое упрощение имеет особый смысл при реализации алгоритмов адаптивной настройки законов управления для различных объектов в режиме реального времени. Это связано с тем, что, с одной стороны, несмотря на бурное развитие цифровых устройств, по-прежнему остаются актуальными ограничения, связанные с недостаточными вычислительными ресурсами для подвижных объектов и разных встраиваемых систем, как следствие, порождающих особые требования к простоте применяемых алгоритмов. С другой стороны, достаточно остро ставится вопрос качества управления. Предлагаемый подход может послужить основой для проектирования систем управления с использованием нейронных сетей, нечеткой логики, прогнозирующих моделей и других эффективных средств, базирующихся на современных компьютерных технологиях. В связи с отмеченными обстоятельствами в настоящей статье разобран ряд вопросов, связанных с обобщением использования спектрального подхода к синтезу оптимального многомерного управления по интегральному среднеквадратическому критерию качества для многомерных стационарных случайных процессов в условиях неопределенности их спектральных плотностей.

1. Постановки задачи линейного стационарного оптимального управления многомерными стационарными случайными процессами

Будем считать, что движение динамического объекта описывается векторным рекуррентным уравнением

$$\begin{aligned} X(n+1) &= LX(n) + BU(n) + \varsigma_1(n+1) + \\ &+ \varsigma_2(n+1), X(0) = X_0, \quad (1) \\ \varsigma_2(n) &= \sum_{k=1}^N P_k [u_k(n)]. \end{aligned}$$

Наблюдаемый векторный случайный процесс и выходной $W(n)$, подлежащий оцениванию, процесс описывается стохастическим уравнением

$$\begin{aligned} Y(n+1) &= CX(n) + DU(n) + \eta_1(n+1) + \\ &+ \eta_2(n+1), Y(0) = Y_0, \quad (2) \\ \eta_2(n) &= \sum_{k=1}^M Q_k [v_k(n)] \end{aligned}$$

и выражением $W(n) = EX(n)$.

Здесь $X(n)$ — вектор фазовых координат объекта; $X(0)$ — случайный вектор начальных условий; $Y(0)$ — случайный вектор; $\varsigma_1(n)$ — дискретный векторный белый шум, называемый далее шумом объекта; $\varsigma_2(n)$ — дискретный случайный векторный процесс с неизвестной матричной спектральной положительно определенной диагональной плотностью $H_{x_c}(\lambda)$, порожденный возмущениями $u_k(n)$, называемый шумом канала наблюдения; $\eta_1(n)$ — дискретный векторный белый шум, называемый далее шумом канала измерений; $\eta_2(n)$ — дискретный случайный векторный процесс с неизвестной матричной спектральной плотностью $H_{y_c}(\lambda_1)$, порожденный возмущениями $v_k(n)$; P_k, Q_k, L, B, C, D, E — матрицы или матричные функции времени соответствующих размеров.

В уравнения (1) и (2) входит также векторный управляющий процесс $U(n)$, имеющий $MU(n) = 0$ и ограниченные дисперсии компо-

нент $MU_i^2(n) = \alpha_i^2$. Корреляционные функции компонент процесса $U(n)$ неизвестны. Будем при этом считать, что условия некоррелированности возмущающих процессов, шумов объекта и канала измерений наложены. Относительно матриц L, B, C сделаем следующие допущения:

1) система объект — измеритель (1), (2) является полностью наблюдаемой системой, т.е.

$$\text{rang}(C, L^T C, \dots, (L^{n-1})^T C) = q,$$

где q размерность вектора состояния $X(n)$ системы объекта (1);

2) система объект (1) является полностью управляемой системой, т.е.

$$\text{rang}(B, LB, \dots, L^{n-1} B) = q.$$

Спектральные матричные диагональные неотрицательные плотности $H_{x_c}(\lambda)$ и $H_{y_c}(\lambda_1)$ процессов u и v удовлетворяют моментным векторным неравенствам

$$\int_{\Lambda_1} H_{x_c}(\lambda) \Phi_j d\lambda \leq b_j, j = 1, \dots, m_1; \quad (3)$$

$$\int_{\Lambda_1} H_{y_c}(\lambda) \Psi_j d\lambda \leq c_j, j = 1, \dots, m_2;$$

$$H_{x_c}(\lambda) \geq 0, H_{y_c}(\lambda) \geq 0,$$

где $\Phi_j(\lambda) \in \bar{R}_+^{m_1}, \Psi_j(\lambda) \in \bar{R}_+^{m_2}$ — неотрицательные, четные по λ заданные векторные функции частоты; $R_+^n = \{x \in R^n \mid x_i > 0, i = 1, \dots, n\}$ — положительный ортант пространства R^n ; b_j, c_j — заданные неотрицательные постоянные векторы; $\bar{R}_+^n = \{x \in R^n \mid x_i \geq 0, i = 1, \dots, n\}$ — неотрицательный ортант R^n (замыкание R_+^n).

Физический смысл ограничений (3) состоит в том, что на определенные возмущения в системе объект — измеритель (1), (2), корреляционные функции которых точно неизвестны, однако известны верхние оценки их дисперсий и (или) дисперсий производных и т.п.,

наложены ограничения на их моменты и на области их сосредоточения спектра (ожидаемые полосы частот).

На наблюдаемый процесс $Y(n)$ налагается лишь условие линейной регулярности максимального ранга, т.е. в терминах матричной спектральной плотности условие Пэли — Винера имеет аналогичный вид [27] для случая рациональной матричной спектральной плотности $S(\mu)$ относительно μ

$$\int_{-\pi}^{\pi} \frac{\ln \det S(\mu)}{1 + \mu^2} d\mu > -\infty, \quad (4)$$

обеспечивающего представление — факторизацию

$$S(\lambda) = F(e^{-i\lambda}) F^*(e^{-i\lambda}), \quad (4a)$$

где матричные функции $F(i\lambda)$ и $F^{-1}(i\lambda)$ — аналитические в нижней полуплоскости переменной λ , т.е. являются частотными характеристиками физически осуществимых (формирующего и отбеливающего) фильтров; $(*)$ — знак сопряжения матриц.

В настоящей статье решение задачи факторизации будет основываться на разработанном ранее методе преобразования Гильберта в [19] для скалярного стационарного случайного процесса. Там показано, что граничное значение функции $\Gamma(e^{i\lambda})$ аналитической в нижней полуплоскости удовлетворяет граничному значению МСП $S(\lambda) = |\Gamma(e^{i\lambda})|^2$. По наблюдению процесса $Y(n)$ на полубесконечном отрезке времени $v = -\infty, \dots, n$ требуется найти оптимальную линейную оценку $\hat{X}(n)$ случайного вектора $X(n)$, т.е. вектор $\hat{X}(n) = (\hat{X}_1(n), \dots, \hat{X}_q(n))$ ортогональных проекций $\hat{X}_j(n) = \hat{M}(X_j(n) | H^Y(n))$ случайных величин $X_j(n)$, $j = 1, \dots, q$ на линейное подпространство $H^Y(n)$, порожденное случайными величинами $Y_k(v)$, $k = 1, \dots, m$, $v = -\infty, \dots, n$

$$\hat{X}(n) = \int_{-\pi}^{\pi} e^{i\lambda n} \hat{G}_v(e^{-i\lambda}) \tilde{\mu}^X(d\lambda), \quad (5)$$

где $\tilde{\mu}_{x_c}(d\lambda)$ — известная векторная ортогональная случайная мера процесса $X(n)$, $\tilde{\mu}_{x_d}(d\lambda)$ — неизвестная векторная ортогональная случайная мера процесса $X(n)$, взаимно некоррелированная с известной мерой $\tilde{\mu}_{x_c}(d\lambda)$. В выражении (5) $\hat{G}_v(e^{-i\lambda})$ — матричная частотная характеристика (МЧХ) оптимального минимаксного линейного фильтра с учетом ограничений (3), наложенных на неизвестные матричные спектральные плотности процессов $X(n)$ и $Y(n)$. Все векторные ортогональные случайные меры будем считать абсолютно непрерывными и стационарно связанными, а значит, у них существуют матричные спектральные плотности.

Процессы $X(n)$ и $Y(n)$ имеют матричные спектральные плотности

$$\begin{aligned} S(\lambda) &= S^{YY}(\lambda); \\ S^{XX}(\lambda) &= M \mu^X(d\lambda) (\mu^X(d\lambda))^* / d\lambda; \\ S^{XY}(\lambda) &= M \mu^X(d\lambda) (\mu^Y(d\lambda))^* d\lambda; \\ S^{YY}(\lambda) &= M |\mu^Y(d\lambda)|^2 / d\lambda. \end{aligned} \quad (5a)$$

Спектральные плотности $S^{XX}(\lambda)$ и $S^{YY}(\lambda)$ возможно представить в виде

$$\begin{aligned} S^{XX}(\lambda) &= S_c^{XX}(\lambda) + H_{x_c}(\lambda); \\ S^{YY}(\lambda) &= S_c^{YY}(\lambda) + H_{y_c}(\lambda). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь S_c^{XX}, S_c^{YY} — известные положительные матричные спектральные плотности процессов $X(n)$ и $Y(n)$, которые в общем случае не являются рациональными, а меры $\mu_{x_c}(d\lambda)$, $\mu_{y_c}(d\lambda)$ обладают свойством

$$M[d\mu_{x_c}(\lambda_1) d\mu_{x_c}^*(\lambda_2)] = H_{x_c}(\lambda_1) \delta(\lambda_1 - \lambda_2) d\lambda_1;$$

$$M \left[d\mathbf{\mu}_{y_c}(\lambda_1) d\mathbf{\mu}_{y_c}^*(\lambda_2) \right] =, \\ = \mathbf{H}_{y_c}(\lambda_1) \delta(\lambda_1 - \lambda_2) d\lambda_1$$

где $\mathbf{H}_{x_c}(\lambda)$, $\mathbf{H}_{y_c}(\lambda)$ — неизвестные положительно полуопределенные диагональные матричные функции, подчиняющиеся ограничениям вида (3). Вопрос факторизации МСП $\mathbf{S}^{YY}(\lambda)$ в ее представлении (6) в предположении о линейной регулярности максимального ранга ее известной составляющей $\mathbf{S}_c^{YY}(\lambda)$ решается на основе теоремы 1 (доказательство теоремы 1 приводится в Приложении). Оптимальная оценка для минимаксного фильтра дается выражением [21]

$$\mathbf{G}(e^{-i\lambda}) = \left[\mathbf{S}^{XY}(\lambda) (\mathbf{F}^{-1}(e^{i\lambda}))^* \right]_{PR} \mathbf{F}^{-1}(e^{-i\lambda})$$

в результате применения интегральных преобразований над матричной частотной характеристикой сглаживающего оптимального фильтра $\mathbf{H}_s(\lambda)$

$$\mathbf{H}_s(\lambda) = \mathbf{S}^{X\zeta}(\lambda) (\mathbf{S}^{\zeta\zeta}(\lambda))^{-1} = \\ = \mathbf{S}^{XY}(\lambda) (\mathbf{F}^{-1}(e^{-i\lambda}))^*$$

процесса $X(n)$ по фундаментальному процессу $\zeta(n)$

$$\zeta(n) = \int_{-\pi}^{\pi} e^{i\lambda n} \mathbf{v}(d\lambda) = \\ = \int_{-\pi}^{\pi} e^{i\lambda n} \mathbf{F}^{-1}(e^{-i\lambda}) \mathbf{\mu}^Y(d\lambda)$$

в виде

$$\mathbf{E}(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} e^{i\lambda n} \mathbf{H}_s(\lambda) d\lambda, \\ \mathbf{H}_s(\lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-i\lambda n} \mathbf{E}(n),$$

называемых сепарацией и обозначаемых $\mathbf{H}(e^{-i\lambda}) = [\mathbf{H}_s(\lambda)]_{PR}$.

Требуется найти линейное стационарное векторное управление

$$\mathbf{U}(n), U_j(n) \in H^Y(n), j = 1, \dots, r,$$

$$U_j(n) \in H^Y(n), j = 1, \dots, r,$$

минимизирующее критерий качества управления

$$R = \mathbf{M} \mathbf{X}^T(n) \mathbf{Q} \mathbf{X}(n) \rightarrow \min_{\mathbf{U}(n)}, \quad (7)$$

где $\mathbf{Q}$ — неотрицательно определенная матрица при ограничениях по дисперсии, наложенных на компоненты $U_j(n)$ управляющего процесса $\mathbf{U}(n)$:

$$\mathbf{M} U_j^2(n) \leq a_j^2, j = 1, \dots, r, \quad (8)$$

и условиях неупреждаемости, наложенных на компоненты $U_j(n)$ по отношению к наблюдаемому процессу $\mathbf{Y}(n)$: $U_j(n) \in H^Y(n)$, $j = 1, \dots, r$.

Пусть векторные стационарные случайные процессы $\mathbf{X}_0(n)$, $\mathbf{Y}_0(n)$ заданы точно, управляемый процесс $\mathbf{X}(n)$ и наблюдаемый $\mathbf{Y}(n)$ выражаются в виде

$$\mathbf{X}(n) = \mathbf{X}_0(n) + \mathbf{X}^U(n), \\ \mathbf{Y}(n) = \mathbf{Y}_0(n) + \mathbf{Y}^U(n), \quad (8a)$$

где $\mathbf{X}^U(n)$ и $\mathbf{Y}^U(n)$ — составляющие процессов $\mathbf{X}(n)$ и $\mathbf{Y}(n)$, обусловленные векторным стационарным управляющим процессом $\mathbf{U}(n)$ и выражающиеся в виде

$$\mathbf{X}^U(n) = \sum_{v=-\infty}^n \mathbf{B}(n-v) \mathbf{U}(v), \\ \mathbf{Y}^U(n) = \sum_{v=-\infty}^n \mathbf{D}(n-v) \mathbf{U}(v), \quad (9)$$

где $\mathbf{B}(n-v)$, $\mathbf{D}(n-v)$ — матричные импульсные переходные функции (МИПФ) системы (1), (2).

Подставляя ортогональное разложение $X(n) = \hat{X}(n) + \tilde{X}(n)$ в выражение для критерия (7), в результате получим, что $R = \hat{R} + \tilde{R}$, где $\hat{R}(U) = M\hat{X}(n)Q\hat{X}(n)$ — средний риск управления, $\tilde{R} = M\tilde{X}^T(n)Q\tilde{X}(n)$ — средний риск фильтрации. Поскольку $\tilde{R}$ не зависит от управляющего процесса $U(n)$, задача оптимального управления сводится к минимизации $\hat{R}(U)$. Корректность применимости «принципа разделения» в решении поставленной задачи оптимального управления дается в теореме 2 (доказательство теоремы 2 приводится в Приложении 1).

Пусть $\mathbf{v}(d\lambda)$ — векторная ортогональная фундаментальная случайная мера процесса $Y(n)$.

Тогда процесс $\hat{X}_0(n)$ будет иметь спектральное представление

$$\hat{X}_0(n) = \int_{-\pi}^{\pi} e^{i\lambda n} \hat{G}_v(e^{-i\lambda}) \mathbf{v}(d\lambda),$$

где $\hat{G}_v(e^{-i\lambda})$ — МЧХ линейного минимаксного фильтра, оптимального по отношению к фундаментальному процессу $\zeta(n)$, а процесс $U(n)$ будет иметь спектральное представление

$$U(n) = \int_{-\pi}^{\pi} e^{i\lambda n} \mathbf{H}(e^{-i\lambda}) \hat{G}_v(e^{-i\lambda}) \mathbf{v}(d\lambda). \quad (10)$$

Оптимальный линейный регулятор для стохастической системы (1), (2) будем искать в представлении (10), где $\mathbf{H}(e^{-i\lambda})$ — вектор МЧХ управляющего линейного звена (управляющего устройства) по отношению к процессу $\hat{X}_0(n)$:

$$\hat{X}(n) = \int_{-\pi}^{\pi} e^{i\lambda n} \Delta(e^{-i\lambda}) \hat{G}_v(e^{-i\lambda}) \mathbf{v}(d\lambda).$$

Тогда процесс $\hat{X}(n)$ будет иметь спектральное представление.

По сути, задача свелась к нахождению дискретного регулятора во временной области в виде

$$\hat{U}(n) = \hat{\mathbf{K}}(n) \hat{X}_0(n), \quad (11)$$

где $\hat{\mathbf{K}}(n)$ — матрица коэффициентов усиления регулятора, имеющая в спектральном представлении вид

$$\hat{\mathbf{K}}(n) = \int_{-\pi}^{\pi} e^{i\lambda n} \hat{\mathbf{H}}_{opt}(e^{-i\lambda}) \mathbf{v}(d\lambda). \quad (12)$$

Для сравнения отметим, что в данной ситуации в основе конструкции стохастического наблюдателя, который должен «вырабатывать» наилучшую с позиции функционала $\hat{R}(U) = M\hat{X}(n)Q\hat{X}(n)$ оценку измеряемого процесса $Y(n)$ для стохастической системы (1), (2)

лежал минимаксный фильтр $\hat{G}_v(e^{-i\lambda})$ через инструмент факторизации матричной спектральной плотности $\mathbf{S}(\lambda)$ наблюдаемого процесса $Y(n)$, но возможен также и вариант синтеза дискретного регулятора с использованием фильтра Калмана в качестве наблюдателя, представленного в частотно-непрерывной области ранее в [14], если добавить вспомогательный функционал оптимизации $\tilde{R} = M\mathbf{e}^T(n)Q\mathbf{e}(n)$ для минимизации ошибки восстановления (наблюдения, фильтрации) $\mathbf{e}(n) = X(n) - \hat{X}(n)$ к основному критерию оптимизации по МЧХ управляющего линейного звена (управляющего устройства) по отношению к процессу $\hat{X}_0(n)$ для поиска оптимального матричного коэффициента усиления $\hat{\mathbf{K}}(n)$ в оптимальном наблюдателе (оптимальном фильтре Калмана — Бьюси). Ниже будут представлены уравнения, описывающие оптимальный наблюдатель фильтра Калмана и структуру оптимального регулятора, формирующего оптимальное управление.

2. Решение задачи оптимального управления

Для поиска оптимального решения далее рассматривается задача минимизации функционала Лагранжа риска управления по строке управления $\mathbf{H}^{(j)}(e^{-i\lambda})$:

$$\int_{-\pi}^{\pi} Sp\left\{\Lambda(e^{-i\lambda})N(\lambda)\Lambda^*(e^{-i\lambda})\right\}d\lambda + \\ + \lambda_j \left(\int_{-\pi}^{\pi} H^{(j)}(e^{-i\lambda})N(\lambda)(H^{(j)}(e^{-i\lambda}))^* d\lambda - a_j^2 \right) \rightarrow \min_{H^{(j)}} \quad (13)$$

$$j=1, \dots, r,$$

где введены обозначения

$$\Lambda(e^{-i\lambda}) = I - B(e^{-i\lambda})H(e^{-i\lambda}), \\ N(\lambda) = \hat{G}_v(e^{-i\lambda})Q\hat{G}_v^*(e^{-i\lambda}),$$

$\lambda_j > 0$ — j -й множитель Лагранжа, соответствующий j -му ограничению (8).

Введем обозначение для подынтегральной функции функционала Лагранжа

$$\ell(H^{(j)}, \lambda_j) = Sp\left\{\Lambda(e^{-i\lambda})N(\lambda)\Lambda^*(e^{-i\lambda})\right\} + \\ + \lambda_j \left(\int_{-\pi}^{\pi} H^{(j)}(e^{-i\lambda})N(\lambda)(H^{(j)}(e^{-i\lambda}))^* d\lambda - a_j^2 \right). \quad (14)$$

Уравнения Эйлера, соответствующие (14), можно записать в виде

$$\frac{\partial \ell(H^{(j)}, \lambda_j)}{\partial H^{(j)}} = 0, \quad \frac{\partial \ell(H^{(j)}, \lambda_j)}{\partial \lambda_j} = 0, \quad j=1, \dots, r. \quad (15)$$

Из соотношений (15) можно воспользоваться приемом нахождения минимума следа функционала Лагранжа риска управления с использованием операций матричного дифференцирования скалярной функции от матричного аргумента $H^{(j)}$ (см. Приложение 2). В результате применения этих операций получаем оптимальный вектор управлений

$$H_{\text{opt}}^{(j)} = \frac{B^{(j)}(e^{-i\lambda})}{B^{(j)}(e^{-i\lambda})B^{(j)*}(e^{-i\lambda}) + \lambda_j^{\text{opt}}}; \\ j=1, \dots, r, \quad (16)$$

где $B^{(j)}(e^{-i\lambda})$ — это j -я строка матрицы $B(e^{-i\lambda})$. Заметим, что представление (16)

корректно в смысле применения операции деления на выражение $B^{(j)}(e^{-i\lambda})B^{(j)*}(e^{-i\lambda}) + \lambda_j^{\text{opt}}$, так как последнее представляет собой скалярное выражение, всегда отличное от нуля.

Искомый вектор множителей Лагранжа $\lambda^{\text{opt}} = (\lambda_1^{\text{opt}}, \dots, \lambda_r^{\text{opt}})$ можно найти с помощью соотношений (8) после подстановки в них выражений (16) для оптимального вектора управлений $H_{\text{opt}}^{(j)}$. В итоге оптимальные множители Лагранжа λ_j^{opt} можно найти из соотношений

$$\left(\frac{B^{(j)}(e^{-i\lambda})}{B^{(j)}(e^{-i\lambda})B^{(j)*}(e^{-i\lambda}) + \lambda_j} \right) (\hat{G}_v(e^{-i\lambda})Q\hat{G}_v^*(e^{-i\lambda})) \times \\ \times \left(\frac{B^{(j)}(e^{-i\lambda})}{B^{(j)}(e^{-i\lambda})B^{(j)*}(e^{-i\lambda}) + \lambda_j} \right)^* = a_j^2.$$

В результате решения рассмотренной нами задачи по поиску оптимального управления по неполным данным были получены необходимые и достаточные условия существования седловой точки в явной частотной форме в соответствующей игровой задаче, аналогичные тем, которые были получены в работе Г.А. Голубева для задач А и Б [15] в эквивалентной задаче в непрерывном времени для объекта, описываемого системой стохастических линейных дифференциальных уравнений с постоянными параметрами с квадратичным функционалом качества $\hat{R}$ по искомому управлению $\hat{U}(n)$ с помощью МЧХ управляющего линейного звена $H(e^{-i\lambda})$ (управляющего устройства) по отношению к управляемому марковскому процессу второго порядка $\hat{X}_0(n)$. Аналитическая оценка для оптимального управления в стационарном режиме согласуется с аналогичным результатом, полученным Ю. Ту [28] и Н.Н. Красовским [29] для оценки оптимального многомерного управления в дискретной форме во временной области для стационарного случая как сходящийся многошаговый процесс, получен-

ный ими с применением принципа оптимальности Беллмана — методом динамического программирования. В итоге получена следующая теорема.

Решение задачи оптимального управления

Теорема 2. *Решение задачи нахождения детерминированного оптимального управления*

$$\hat{R}(G_v, U) = M\hat{X}^T(n)Q\hat{X}(n)$$

по неполным данным для отфильтрованного управляемого процесса из наблюдаемого $Y(n)$ дается условиями минимума критерия

$$\hat{R}(G_v, U) = M\hat{X}^T(n)Q\hat{X}(n)$$

в форме существования минимаксного линейного фильтра $\hat{G}_v$ с функцией выигрыша

$$R(G_v, U) = M\tilde{X}^T(n)Q\tilde{X}(n)$$

при ограниченных моментах второго порядка управляющих воздействий $U(n)$ по неполным данным в условиях неполной информации о нерациональных спектральных характеристиках возмущающих процессов, действующих на линейный динамический объект и присутствующих в канале измерений.

Доказательство теоремы 2 представлено в Приложении 1.

Для найденного минимаксного фильтра $G(H_{xc}, H_{yc})$ решаем задачу оптимального управления.

При решении указанной выше задачи оптимального управления необходимо учесть ограничения по дисперсии (8) и условия, наложенные на процессы $U(n)$. Для этого применяется метод ортогонального разложения процесса [10]. Аналогичная теорема существования седловой точки сформулирована в [20; 21; 15] для стохастических линейных дифференциальных уравнений в задаче синтеза минимаксного стационарного линейного фильтра координат линейного динамического объекта в непрерывном и дискретном случаях при ограниченных

дисперсиях действующих на него возмущений. Необходимые формулы для вычисления производных следа по матричному аргументу приводятся ниже в предположении, которое представлено в Приложении 2.

3. Синтез оптимального наблюдателя и субоптимального регулятора с помощью фильтра Калмана

Пусть не все переменные состояния объекта (1) доступны непосредственному измерению, и пусть, кроме того, измерения осуществляются с помехами типа «белого шума» в условиях линейной регулярности максимального ранга:

$$\begin{aligned} X(n+1) &= LX(n) + BU(n) + \\ &+ \varsigma_1(n+1) + \varsigma_2(n+1), \quad X(0) = X_0, \\ \varsigma_2(n) &= \sum_{k=1}^N P_k [u_k(n)], \end{aligned} \quad (17)$$

где $\varsigma_1(n)$, $\varsigma_2(n)$ — стационарные некоррелированные между собой процессы с

$$M\varsigma_1(n) = 0, M\varsigma_2(n) = 0, M\varsigma_1(n)\varsigma_2(n) = 0$$

с нерациональными в общем случае спектральными плотностями $S_1(\lambda)$ и $S_2(\lambda)$, а наблюдаемый процесс $Y(n)$ выражается в виде

$$\begin{aligned} Y(n) &= C^T X(n) + \varsigma_1(n) + \varsigma_2(n+1), \\ Y(0) &= Y_0, \\ S_1(\lambda) &= M\varsigma_1^2(n) = I\tau^2 \leq Ia_1^2, \\ S_2(\lambda) &= M\varsigma_2^2(n) \leq Ia_2^2. \end{aligned} \quad (18)$$

Предполагается, что система объект — измеритель (17), (18) в отсутствие ошибок измерения и возмущений наблюдаема и управляема. Оптимальный стохастический регулятор с обратной связью по состоянию, формирующий искомое управление, состоит из двух частей: устройства, реализующего оптимальный закон управления в виде

$$\hat{U}(n) = \hat{K}(n)\hat{X}_0(n), \quad (19)$$

где оценка $\hat{X}_0(n)$ вырабатывается во втором устройстве восстановления (наблюдения, фильтрации) — оптимальном наблюдателе (фильтре Калмана — Бьюси). Как и в детерминированном случае, наблюдатель по форме фильтра Калмана описывается в установившемся режиме уравнением [14] в виде

$$\hat{X}(n+1) = L\hat{X}(n) + K_{xx}C[Y(n) - C^T\hat{X}(n)] + B \sum_{k=-\infty}^n Z(n-k)C[Y(k) - C^T\hat{X}(k)], \quad (20)$$

где $\hat{K}(n) = K_{xx}(n)C$ — искомая оптимальная матрица усиления регулятора, а корреляционная матрица $K_{xx}(n)$ процесса $X(n)$, отнесенная к τ^2 , удовлетворяет уравнению в установившемся режиме

$$LK_{xx} + K_{xx}L^T + KB^T + BK^* - K_{xx}CC^TK_{xx} = 0, \quad (21)$$

где $Z(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{i\lambda k} Z_+(\lambda) d\lambda$ — оригинал изображения $Z_+(\lambda) = \sum_{k=0}^{\infty} z_k e^{-i\lambda k}$, представляющий собой физически реализуемый фильтр $Z(\lambda) = K_{xx}C$, $K = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{K}_{xx} d\lambda$. Конструктивный способ, позволяющий определить интеграл K , описан подробно в монографии [14, с. 171] с помощью функций $\Phi(i\lambda)$ и $X_u(\lambda)$:

$$\begin{aligned} \Phi(i\lambda) &= \\ &= \left[\tilde{A}^{-1}B(1 + C^T\tilde{A}^{-1}K_{xx}C) - \tilde{A}^{-1}K_{xx}CC^T\tilde{A}^{-1}B \right] \times \\ &\times \frac{U^-(i\lambda)}{V^*(i\lambda)} \times \frac{1}{|C^T\tilde{A}^{-1}B|^2}; \\ X_u(\lambda) &= I + |C^T\tilde{A}^{-1}B|^2 \frac{H(\lambda)}{\tau^2}, \end{aligned}$$

где $U^-(i\lambda)$ и $V^*(i\lambda)$ — матричные полиномы от $i\lambda$, имеющие нули соответственно в верхней ($\text{Im } \lambda > 0$) и нижней ($\text{Im } \lambda < 0$) полуплоскостях, полученные через факторизованное представление определителя матрицы

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= \omega I - L, \omega = e^{-i\lambda}, \\ \det \tilde{A} &= \det(\omega I - L) = U(i\lambda)V^*(i\lambda). \end{aligned}$$

Отметим также, что в силу наблюдаемости системы (17) можно определить вектор весовых коэффициентов $K_{xx}C$, а значит, и вектор коэффициентов усиления оптимального регулятора $\hat{K}(n)$, не обращаясь к системе уравнений (21). Для этого необходимо составить уравнения для нулей $i\lambda = \gamma^-$ и $i\lambda = \gamma^+ C^T\tilde{A}^{-1}B$ (если они есть) в верхней полуплоскости

$$\begin{aligned} I + C^T(\gamma^- I + L)K_{xx}C &= \\ &= X_u^+(\gamma^-)U^-(-\gamma^-)/U^-(\gamma^-) \end{aligned} \quad (22)$$

и для нулей $i\lambda = \gamma^+$ в нижней полуплоскости

$$I + C^T(\gamma^+ I + L)K_{xx}C = \frac{1}{X_u^+(\gamma^+)} \times \frac{U^-(-\gamma^+)}{U^-(\gamma^+)}. \quad (23)$$

Таким образом, для нахождения вектора усиления регулятора и фильтра решения системы (21) не требуется. В случае определения диагональных моментов корреляционной матрицы K_{xx} , определяющих качество фильтрации, решение системы (21) упрощается и сводится к решению линейной системы вида

$$AK_{xx} + K_{xx}A = Y.$$

В конкретных приложениях часто регулятор в форме фильтра Калмана (20), в котором полагается $Z = 0$, мало проигрывает оптимальному. В этом случае задача сводится к определению только «весов» $K_{xx}C$. В силу предположения наблюдаемости и управляемости системы (17), (18) можно показать, что система

система (17), (18) асимптотически устойчива за счет выбора матрицы усиления $\hat{K}(n)$ по формуле $\hat{K}(n) = K_{xx}(n)C$ и в управляемости системы (17) всегда найдется единственная положительно определенная матрица $\hat{K}_{xx}^0(n)$ обеспечивающая асимптотическую устойчивость системы (17), (18). Для этого можно воспользоваться прямым методом Ляпунова, если в качестве функции Ляпунова принять $V(n) = X^T(n)K_{xx}^0 X(n) > 0$. Доказательство этого утверждения очевидно и для непрерывного случая¹. Если объект управления асимптотически устойчив, то ошибка восстановления с течением времени будет уменьшаться $\lim_{n \rightarrow \infty} e(n) = 0$.

4. Пример синтеза оптимального управления

Приведем пример применения предлагаемого метода к решению задачи оптимального управления координат динамического объекта — положения и скорости, когда движение объекта описывается рекуррентными уравнениями

$$\begin{aligned} X_1(n+1) &= X_1(n) + hX_2(n) + \frac{h^2}{2}U_1(n) + U_2(n); \\ X_2(n+1) &= X_2(n) + hU_1(n) + U_2(n), \end{aligned} \quad (24)$$

где h — длительность любого n -го такта, $U_1(n), U_2(n)$ — стационарные процессы ($MU_1(n) = 0, MU_2(n) = 0$) с нерациональными в общем случае спектральными плотностями $S_1(\lambda)$ и $S_2(\lambda)$, а наблюдаемый процесс $Y(n)$ выражается в виде

$$\begin{aligned} Y(n) &= X_1(n) + \eta(n+1) + U_2(n), \quad Y(0) = Y_0; \\ S_1(\lambda) &= MU_1^2(n) \leq a_1^2; \\ S_2(\lambda) &= MU_2^2(n) \leq a_2^2, \end{aligned} \quad (25)$$

где $\eta(n)$ — дискретный белый шум с дисперсией $\tau^2 = M\eta^2$.

С учетом ограничения (25) на неизвестную компоненту $U_1(n)$ — управляющее возмущение в помехе канала измерений, найдем оптимальный минимаксный фильтр $\hat{G}_v$ методом факторизации и наихудшую спектральную плотность компоненты $U_2(n)$ для процесса $\hat{X}_0(n)$. Воспользовавшись результатом решения аналога этого примера, приводимого в монографии О.М. Куркина и др. [14, пример 3.10] для нахождения спектральной наихудшей плотности компоненты $U_2(n)$, будем иметь ее аналитическое представление в виде

$$h_2(\lambda) = \begin{cases} a_2^2 / [2(\pi - \lambda_0)] & \text{при } |\lambda| \geq \lambda_0; \\ 0 & \text{при } |\lambda| < \lambda_0. \end{cases}$$

Частотные характеристики от входа $U_1(n)$ до выходов $X_1(n), X_2(n)$, и $X(n)$ имеют вид

$$C_1(e^{i\lambda}) = \frac{h^2 e^{i\lambda} + 1}{2 e^{i\lambda} - 1};$$

$$C_2(e^{i\lambda}) = \frac{h}{e^{i\lambda} - 1};$$

$$C(e^{i\lambda}) = \begin{bmatrix} C_1(e^{i\lambda}) \\ C_2(e^{i\lambda}) \end{bmatrix}.$$

Спектральные плотности фильтруемого и наблюдаемого процессов

$$S^{XX}(\lambda) = C(e^{i\lambda})S_1(\lambda)C^*(e^{i\lambda});$$

$$S(\lambda) = |C_1(e^{i\lambda})|^2 S_1(\lambda) + h_2(\lambda) + \tau^2.$$

А их взаимная спектральная плотность

$$S^{XY}(\lambda) = C(e^{i\lambda})S_1(\lambda)C_1^*(e^{i\lambda}).$$

На втором этапе решим задачу факторизации МСП $S(\lambda)$, воспользовавшись теоремой 2

¹ Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы : учебное пособие. Москва : Высшая школа, 1989. 263 с. ISBN 5-06-000037-0

(о факторизации МСП) из работы Г.А. Голубева [20]. Решение задачи факторизации МСП $S(\lambda)$ состоит в расчете матричных функций $A_l(\lambda) = S^{1/2}(\lambda)$, $\ln A_l(\lambda)$ и затем в расчете $\Phi(\lambda)$ как матричного преобразования Гильберта $\ln A_l(\lambda)$ и формирования МЧХ фильтра $F(e^{-i\lambda})$ и $F^{-1}(e^{-i\lambda})$ по формулам:

$$F(e^{-i\lambda}) = A_l(\lambda) \exp(i\Phi(\lambda)),$$

$$F^{-1}(e^{-i\lambda}) = \exp(-i\Phi(\lambda)) A_l^{-1}(\lambda),$$

а на третьем этапе воспользуемся формулой (8а) и найдем выражение для физического реализуемого минимаксного фильтра $\hat{G}_v$. Наконец на четвертом этапе определим оптимальное управление (регулятор) фильтруемого процесса $X(n)$ в виде (16)

$$H_{opt}(e^{-i\lambda}) = [B(e^{-i\lambda})B^*(e^{-i\lambda}) + \lambda_{opt}]^{-1} B(e^{-i\lambda});$$

$$B(e^{i\lambda}) = \begin{bmatrix} C_1(e^{i\lambda}) \\ C_2(e^{i\lambda}) \end{bmatrix},$$

$$\lambda_{opt} = \frac{\sqrt{ba}}{a_2} - b = \left[h \cdot \operatorname{ctg} \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{h^2}{4} + \frac{1}{2 \cos^2 \frac{\lambda}{2}}} \right] \times$$

$$\times \left[\frac{1}{a_2} \cdot \frac{\sqrt{\frac{h^4}{4} \operatorname{ctg}^2 \frac{\lambda}{2} \cdot a_1^2 + \frac{a_2^2}{2(\pi - \lambda_0)} + \tau^2}}{h \cdot \operatorname{ctg} \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{h^2}{4} + \frac{1}{2 \cos^2 \frac{\lambda}{2}}}} - 1 \right];$$

$$\hat{a} = \hat{G}_v(e^{-i\lambda}) Q \hat{G}_v^*(e^{-i\lambda}).$$

$$b = B(e^{-i\lambda}) B^*(e^{i\lambda}) = |B(e^{-i\lambda})|^2 =$$

$$= h^2 \operatorname{ctg}^2 \frac{\lambda}{2} \left[\frac{h^2}{4} + \frac{1}{2 \cos^2 \frac{\lambda}{2}} \right].$$

Матрица ковариаций ошибки восстановления (фильтрации) $e(n) = X(n) - \hat{X}(n)$ будет иметь вид

$$K_{ee} = M e(n) e^T(n) = \int_{-\pi}^{\pi} (S^{XX} - G_v^*(e^{i\lambda}) S(\lambda) G_v(e^{i\lambda})) d\lambda. \quad (26)$$

Для приближенной оценки параметра $\hat{a}$ в установившемся режиме воспользуемся свойством асимптотически устойчивости объекта управления, то есть поскольку ошибка восстановления с течением времени будет уменьшаться $\lim_{n \rightarrow \infty} e(n) = 0$, то из последнего соотношения для ковариаций матрицы при выборе весовой матрицы

$$Q = S(\lambda) = |C_1(e^{i\lambda})|^2 S_1(\lambda) + h_2(\lambda) + \tau^2,$$

следует, что субоптимальная оценка параметра $\hat{a}$ может быть представлена в виде следа спектральной плотности ошибки восстановления $Sp S^{XX}$:

$$\hat{a} \approx Sp(\hat{G}_v(e^{i\lambda}) S(\lambda) \hat{G}_v^*(e^{i\lambda})) =$$

$$= |\hat{G}_v(e^{i\lambda})|^2 S(\lambda) = Sp S^{XX} =$$

$$= S_1 \cdot h^2 \operatorname{ctg}^2 \frac{\lambda}{2} \left[\frac{h^2}{4} + \frac{1}{2 \cos^2 \frac{\lambda}{2}} \right].$$

Необходимые параметры оптимального регулятора найдены. Графики изменения коэффициента усиления $K_{xx}(n)$ по времени для квази-оптимального регулятора, построенного: 1 — методом факторизации матричной спектральной плотности, в общем случае нерациональной для наблюдаемого процесса, и измеряемого

в форме наблюдателя — фильтра Калмана — Бьюси представлены на рисунке по методу факторизации спектральной плотности; 2 — по методу фильтра Калмана при $h=1$, $\tau^2=25$, $a_1^2=25$, $a_2^2=25$. Начальные значения матрицы $K_x(0)$ были выбраны исходя из корреляционных оценок по положению $X_1(n)$ и скорости $X_2(n)$, полученным в примере близким по содержанию к модели, рассматриваемой в нашем примере, который представлен в работе О.М. Куркина и др. [14, с.175] и имеют вид

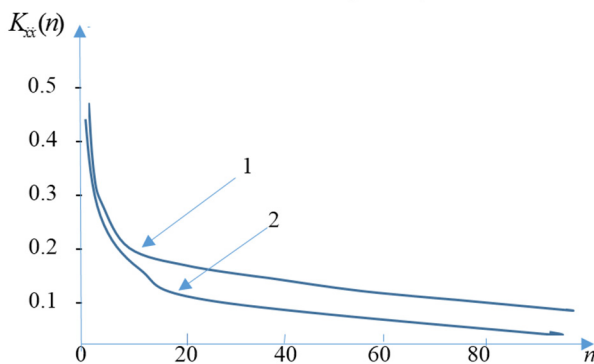
$$K_{xx}(0) = \gamma \lambda_0,$$

$$K_{\dot{x}\dot{x}}(0) = \lambda_0^3 \left[\gamma^3 / 6 + (1 + 6\gamma^2) / (9\pi) \right],$$

$$K_{x\dot{x}}(0) = \gamma^2 \lambda_0^2 / 2,$$

где параметр γ , находится из соотношения

$$\frac{1}{\gamma} \operatorname{tg} \frac{1}{\gamma} = 1, \lambda_0^2 = \frac{15}{4} \cdot \frac{(\gamma^2 + 1)}{(1 + 6\gamma^2)} \frac{a_2}{\tau^2}.$$



Изменение ковариации ошибки скорости по времени для квазиоптимального регулятора:
1 — по методу факторизации спектральной плотности;
2 — по методу фильтра Калмана
Источник: выполнено И.Г. Сидоровым

Time variation of the velocity error covariance for a quasi-optimal controller:
1 — by the spectral density factorization method;
2 — by the Kalman filter method
Source: by I.G. Sidorov

Из построенных графиков видно, что проигрыш по точности определения ковариации ошибки скорости спектрального регулятора по

сравнению с регулятором — фильтром Калмана — Бьюси составляет примерно 10 %, что обычно допустимо на практике. Из полученных выше соотношений видно, что построение оптимального многомерного регулятора в условиях неопределенности спектральных плотностей как наблюдаемого, так и измеряемого многомерных дискретных марковских стационарных процессов управляемого многомерного динамического объекта методом факторизации спектральной плотности может быть реализовано на ЭВМ с применением вычислительной математики.

5. Результаты

1. Утверждения теорем 1, 2 дают решение задачи оптимальной минимаксной линейной фильтрации и оптимального линейного управления многомерными стационарными случайными процессами в условиях неопределенности их спектральных плотностей в классе многомерных линейных фильтров Винера — Колмогорова $\mathfrak{K}$ с нерациональными спектральными плотностями возмущений, присутствующими в полезном сигнале и помехе измерений, для которых известны лишь моментные неравенства (3), которым удовлетворяют их спектральные меры в форме существования седловой точки игрового процесса.

2. Выявлены необходимые и достаточные условия существования седловой точки у функционала дисперсии ошибки оценивания оптимального линейного управления многомерными стационарными случайными процессами в условиях неопределенности их спектральных плотностей.

3. Условия оптимальности линейного управления по неполным данным при критерии дисперсии ошибки оценивания могут служить основой для разработки рекуррентных вычислительных процедур, реализующих минимаксный фильтр и оптимальное управление.

4. Получен в простой конструктивной форме многомерный регулятор во временной области с помощью наблюдателя фильтра Калмана — Бьюси для стационарных многомерных случай-

ных процессов для случая, когда управляемый сигнал и наблюдаемый содержат по одному возмущению.

5. В конструктивной форме в частотном представлении разработан оптимальный неупреждающий регулятор H^2 , формируемый на различные виды внешних возмущений, в том числе и окрашенных, присутствующих как в полезном сигнале, так и в помехе измерений, для которых известны лишь моментные неравенства и области их сосредоточения.

Заключение

Предложенный спектральный подход позволил сформировать новый метод решения синтеза оптимального среднеквадратичного минимаксного асимптотически устойчивого линейного регулятора по неполным данным, который основан на алгоритме, содержащем конечное число простых алгебраических операций. Предложенный метод не использует универсальную технику — оптимального синтеза, связанную с решением уравнений Риккати или линейных матричных неравенств. Это снимает трудности, вызванные вырожденностью задачи, и позволяет существенно уменьшить вычислительные затраты, что имеет особую значимость для адаптивной перенастройки систем обработки сигналов и управления, работающих в режиме реального времени. В перспективе также возможен и синтез частотного робастного неупреждающего регулятора в условиях нечеткости линейной динамической системы, присутствующей, в частности, в матрице состояния системы.

Приложение

Доказательство теоремы 1. Условие факторизуемости матричной спектральной плотности $S^{yy}(\lambda) > 0$ следует из того, что она образуется сложением линейно-регулярной максимального ранга матричной строго положительной спектральной плотности $S_c^{yy}(\lambda) > 0$ и положительной полуопределенной матричной спектральной

плотности $\sum_{j=1}^M H_{y_c j}(\lambda) \geq 0$. Свойство линей-

ной регулярности максимального ранга для спектральной плотности $S^{yy}(\lambda)$ вытекает в силу предположения, сделанного выше относительно положительной полуопределенности матричных спектральных плотностей $H_{y_c j}(\lambda)$ и линейной регулярности максимального ранга матрицы $S_c^{yy}(\lambda)$. При этом свойство положительной определенности для матричной спектральной плотности сохраняется и, следовательно, по следствию из теоремы Вейля, все собственные значения будут строго положительными, а значит, она положительно определена по теореме 7.2.1 [30, теорема 7.2.1]. По теореме 6.1 [2] для выполнимости свойства линейной регулярности стационарного процесса необходимо и достаточно, чтобы выполнялось неравенство

$$\int_{-\pi}^{\pi} \ln \det S(\mu) d\mu > -\infty. \quad (\text{П.1})$$

Положительно определенную матрицу $S(\lambda)$ с помощью унитарной матрицы можно привести к диагональному виду. Так как собственные значения $m_k(\mu)$, стоящие на диагонали преобразованной матрицы, строго положительны, то будет выполняться и неравенство (П.1), в силу очевидного разложения для детерминанта матрицы $S(\lambda)$:

$$\ln \det S(\mu) = \sum_{k=1}^m \ln m_k(\mu) < \infty,$$

где m — максимальный ранг положительно определенной матрицы $S_c^{yy}(\lambda)$ для почти всех λ , и к матрице $S^{yy}(\lambda)$ применим также механизм факторизации матричной спектральной плотности по методике, изложенной в [15] с помощью граничного значения аналитической в единичном круге матричной функции $\Gamma(z) = \{\Gamma_{kj}(z)\}_{k=1,m}^{j=1,m}$ класса H_2

$$\Gamma(z) = \exp \left\{ \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \ln S(\mu) \frac{e^{-i\lambda} + z}{e^{-i\lambda} - z} d\mu \right\}.$$

При этом показывается, что матричная функция $\Gamma(z)$ обладает граничным свойством

$$S(\lambda) = \lim_{\rho \rightarrow 1} \left| \Gamma(\rho e^{i\lambda}) \right|^2,$$

для, вообще говоря, нерациональной положительно определенной матрицы $S(\lambda)$.

Доказательство теоремы 2. Рассматривая гильбертово пространство m -мерных векторных комплексных функций $L_2(z)$ ($z(\lambda) \in \mathfrak{R}^m$), которые задаются в виде строк частотных характеристик размера m со скалярным произведением

$$\langle z_1(\lambda), z_2(\lambda) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} z_1(\lambda) \cdot z_2^*(\lambda) d\lambda,$$

Знак (*) — сопряжения вектора $z^* = \bar{z}^T$. Нужно решить следующую вариационную задачу:

$$\begin{aligned} D(G) = \int_{-\infty}^{+\infty} |G(\lambda)|^2 \left(T_1(\lambda) + \sum_{i=1}^M H_{y_{c,i}}(\lambda) \right) + \\ + |G(\lambda) - Q(\lambda)|^2 \left(T_2(\lambda) + \sum_{i=1}^N H_{x_{c,i}}(\lambda) \right) d\lambda \rightarrow \min_{G \in \mathfrak{R}^m}, \\ |G(\lambda)|^2 = \langle G(\lambda), G^*(\lambda) \rangle, \end{aligned}$$

где $\mathfrak{R}^m$ — множество ЧХ физически реализуемых линейных фильтров (аналитических в нижней плоскости), $Q(\lambda)$ — некоторое заданное линейное преобразование полезного сигнала; $H_{x_{c,i}}(\lambda)$ — неизвестные матричные спектральные плотности фильтруемого процесса размерностью $m \times m$; $X(n)$ — неизвестные матричные спектральные плотности в полезной составляющей векторного наблюдения $Y(n)$ размерностью $m \times m$; $T_1(\lambda)$ — матричная спектральная плотность известных составляющих полезного сигнала строго положительная размера $m \times m$; $T_2(\lambda)$ — матричная спектральная плотность известных составляющих фильтруемого сигнала строго положительная размера $m \times m$.

$$T_1(\lambda) > 0, T_2(\lambda) > 0.$$

Функционал $D(G)$ — выпуклый на $L_2(z)$ и дифференцируемый в смысле Фреше [6; 32], причем

$$\begin{aligned} D'(G) = 2 \left(T_1(\lambda) + \sum_{i=1}^M H_{y_{c,i}}(\lambda) \right) G(\lambda) + \\ + 2 \left(G(\lambda) - Q(\lambda) \right) \left(T_2(\lambda) + \sum_{i=1}^N H_{x_{c,i}}(\lambda) \right). \end{aligned}$$

В условиях дополнительных n ограничений, наложенных на выражения $G_k(\lambda) - Q_k(\lambda)P_k(\lambda)$ в нижней полуплоскости

$$[G_k(\lambda) - Q_k(\lambda)P_k(\lambda)]_- = 0, \quad k=0,1,\dots,n,$$

в соответствии с теоремой 1.2 из [31, с. 21] условие оптимальности векторной функции фильтра $G_v(\lambda)$ заключается в выполнении векторно-матричного соотношения

$$X_u(\lambda)G_v(\lambda) - Q(\lambda)T_2(\lambda) = \xi_0(\lambda), \quad (\text{П.2})$$

где

$X_u(\lambda) = T_1(\lambda) + T_2(\lambda) + \sum_{i=1}^N H_{x_{c,i}}(\lambda) + \sum_{i=1}^M H_{y_{c,i}}(\lambda)$, $\xi_0(\lambda)$ — некоторая векторная аналитическая в верхней полуплоскости функция. Проведем в соответствии с теоремой 1 факторизацию матричной функции

$$X_u(\lambda) = X_u^+(\lambda)X_u^-(\lambda).$$

Тогда соотношение (П.2) может быть записано так:

$$X_u^+(\lambda)G_v(\lambda) = T_2(\lambda)Q(\lambda)[X_u^-(\lambda)]^{-1} + U(\lambda),$$

где $U(\lambda) = \xi_0(\lambda)/X_u^-(\lambda)$ — векторная функция аналитическая в верхней полуплоскости. Выделив из левой и правой частей последнего уравнения аналитические в нижней составляющие, получим

$$X_u^+(\lambda)\hat{G}_v(\lambda) = T_2(\lambda)Q(\lambda)[X_u^-(\lambda)]^{-1},$$

Откуда

$$\hat{G}_v(\lambda) = \left[\frac{(T_2(\lambda) + \sum_{x_{c,i}} H_{x_{c,i}}(\lambda))Q(\lambda)}{X_u^-(\lambda)} \right]_+ \frac{I}{X_u^+(\lambda)}.$$

Последнее соотношение может быть записано следующим образом с учетом свойства строгой положительности матрицы

$$T_1(\lambda) + \sum_{i=1}^M H_{y_{c,j}}(\lambda) : \\ \hat{G}_v(\lambda) = \left\{ Q(\lambda) \left[X_u^+(\lambda) - \frac{I}{X_u^-(\lambda)} \right] \right\}_+ \frac{I}{X_u^+(\lambda)}, \quad (\text{П.2})$$

$$\text{где } X_u(\lambda) = I + \frac{T_2(\lambda) + \sum_{i=1}^N H_{x_{c,i}}(\lambda)}{T_1(\lambda) + \sum_{i=1}^M H_{y_{c,j}}(\lambda)},$$

что и требовалось доказать.

Доказательство теоремы 2

Решая задачу отыскания минимаксного фильтра с функцией выигрыша

$$R(G_v, U) = M\tilde{X}^T(n)Q\tilde{X}(n),$$

приходим к искомой структуре многомерного оптимального фильтра Винера — Колмогорова. Метод его нахождения аналогичен методу, описанному в монографии О.М. Куркина и др. [14]. Структура искомого многомерного минимаксного фильтра при неопределенностях в матричных спектральных плотностях возмущающих процессов, присутствующих как в полезной составляющей векторного наблюдения, так и в канале измерителя, выводится покомпонентно для каждой координаты векторного наблюдения $Y(n)$ аналогично методу поиска оптимального фильтра для скалярного случая наблюдения и имеет вид (П. 2), при этом имеет место быть факторизованное представление для функции $\tilde{X}_u(\lambda)$ в ее «масштабированном» по матрице

$$T_1(\lambda) + \sum_{i=1}^M H_{y_{c,j}}(\lambda) > 0$$

виде

$$\tilde{X}_u(\lambda) = I + \frac{T_2(\lambda) + \sum_{i=1}^N H_{x_{c,i}}(\lambda)}{T_1(\lambda) + \sum_{i=1}^M H_{y_{c,j}}(\lambda)} = \\ = |X_u^+(\lambda)|^2, \quad (\text{П.3})$$

где I — единичная матрица с размерностью m .

Представление (П.3а) корректно в смысле применения операции деления на выражение $T_1(\lambda) + \sum_{i=1}^M H_{y_{c,j}}(\lambda)$, так как последнее представляет собой положительно определенную матрицу, следовательно, у нее по теореме об обратной матрице существует обратная матрица.

Для найденного минимаксного фильтра $\hat{G}_v$, решаем задачу оптимального управления по максимуму критерия $\hat{R}(\hat{G}_v, U) = M\hat{X}^T(n)Q\hat{X}(n)$. С учетом ограничений, наложенных на управление $U(n)$, оптимизируем функционал Лагранжа (2.1) на минимум, который существует в силу выпуклости функционала по управлению. Оптимальный вид управляющего звена по отношению к процессу $\hat{X}_0(n)$ дается в виде (16).

Теорема 2 доказана.

Замечание 1. (обоснование корректности в применения «принципа разделения» в построении наблюдателя в форме Калмана)

Корректность применения «принципа разделения» в построении наблюдателя в форме фильтра Калмана (20) при предположениях, наложенных на матричные спектральные плотности известных и неизвестных составляющих полезного сигнала и возмущений, присутствующих в модели объект — измеритель (1)–(2) и обусловлена эквивалентностью модели формирования этих возмущений в виде суммы двух векторных процессов — векторного белого шума и стандартного векторного белого шума, которые суммарно в силу факторизуемости их суммарной спектральной плотности, удовлетворяющей условиям теоремы 1, также представляет векторный эквивалентный белый шум, при этом фильтр Калмана настраивается на верхнюю гарантированную оценку спектральной плотности возмущений в модели [9], следовательно, при сделанных выше предположениях, наложенных на матричные спектральные плотности известных и неизвестных составляющих полезного сигнала и помехи, применим «принцип разделения» в задаче минимизации критерия оптимальности по управлению [1].

Приложение 2

Вспомогательные свойства матричных операций. Формулы для вычисления производных следа по матричному аргументу приводятся ниже (в предположении, что след существует).

1. Дифференцирование скалярной функции по матричному аргументу.

Пусть $\hat{G}_v$, где ρ — скаляр; K — прямоугольная матрица размера $[n \times m]$, $\frac{\partial \rho}{\partial K}$ — есть матрица с элементами

$$\frac{\partial \rho}{\partial K_{ij}}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m.$$

2. Дифференцирование следа Sp квадратной матрицы по матричному аргументу K :

$$\begin{aligned} \frac{\partial Sp(KD)}{\partial K} &= D^*, \frac{\partial Sp(BK^*)}{\partial K} = B, \\ \frac{\partial Sp(A(K) \cdot B(K))}{\partial K} &= \\ &= \frac{\partial A(K) \cdot B}{\partial K} + \frac{\partial B(K) \cdot A}{\partial K}. \end{aligned} \quad (\text{П.4})$$

Знак (*) означает знак сопряжения матриц. В матричных идентификаторах $A(K)$ и $B(K)$ K — переменная, а в идентификаторах A и B — постоянная.

В частном случае

$$\frac{\partial Sp(KAK^*)}{\partial K} = KA^* + KA. \quad (\text{П.5})$$

Если A самосопряженная (эрмитова) $A = A^*$, то $\frac{\partial Sp(KAK^*)}{\partial K} = 2KA$.

$$\frac{\partial SpAKBK^*C}{\partial K} = A^*C^*KB^* + CAKB. \quad (\text{П.6})$$

В приведенных выше формулах (П.4)–(П.6) предполагается, что размерности всех матриц согласованы.

Список литературы

1. Липцер Р.Ш., Ширяев А.Н. Статистика случайных процессов: Нелинейная фильтрация и смежные вопросы. Москва : Наука, 1974. 679 с. URL: <https://djvu.online/file/3680ebqlmcvng> (дата обращения: 20.03.2025).
2. Арато М. Линейные стохастические системы с постоянными коэффициентами. Статистический подход // под ред. Ю.А. Розанова. Москва : Наука, 1989. 306 с. ISBN 5-02-013934-3
3. Емельянова Ю.П. Управление с итеративным обучением дискретной системой с изменяемой эталонной траекторией в условиях неопределенности // Автоматика и телемеханика. 2022. № 9. С. 150–169. <https://doi.org/10.31857/S0005231022090082> EDN: AJGQJE
4. Паламарчук Е.С. О задаче оптимального управления линейной стохастической системой с неограниченной на бесконечности неустойчивой матрицей состояния // Автоматика и телемеханика. 2019. № 2. С. 64–80. <https://doi.org/10.1134/S0005231019020041> EDN: VWVVCW
5. Коробочкин Ю.Б. Минимаксное линейное оценивание стационарной случайной последовательности при наличии возмущения с ограниченной дисперсией // Радиотехника и электроника. 1983. № 11. С. 2186–2190.
6. Пиленичный Б.Н. Необходимые условия экстремума. Москва : Наука, 1976. URL: <https://djvu.online/file/d90athkYPigIE> (дата обращения: 20.03.2025).
7. Шайкин М.Е. Синтез робастного к внешнему возмущению оптимального регулятора по состоянию для одного класса нестационарных стохастических систем // Автоматика и телемеханика. 2015. № 7. С. 127–139. EDN: UMQKUB
8. Позняк А.С., Себряков Г.Г., Семенов А.В., Федосов Е.А. Теория управления: феномен, достижения, перспективы, открытые проблемы. Москва : ГосНИИАС, ИПУ, 1990. 75 с. EDN: UWJKIP
9. Миллер Г.Б., Панков А.Р. Минимаксное управление процессом в линейной неопределенно-стохастической системе с неполными данными // Автоматика и телемеханика. 2007. № 11. С. 164–177. EDN: MWIYBR
10. Панков А.Р., Миллер Г.Б. Минимаксная линейная рекуррентная фильтрация неопределенно стохастических последовательностей по интегральному критерию // Информационные процессы. 2001. Т. 1. № 2. С. 150–166. EDN: HRNMTB
11. Панков А.Р., Семенихин К.В. Минимаксная идентификация неопределенно-стохастической линейной модели // Автоматика и телемеханика. 1998. № 11. С. 158–171.
12. Панков К.В., Платонов Е.Н., Семенихин К.В. Робастная фильтрация процесса в стационарной разностной стохастической системе // Автоматика и телемеханика. 2011. № 2. С. 167–182. EDN: NEJTFT

13. Барабанов А.Е. Синтез адаптивных H^∞ -оптимальных регуляторов // Автоматика и телемеханика. 1999. № 3. С. 55–70. EDN: OJYREL
14. Куркин О.М., Коробочкин Ю.Б., Шаталов С.А. Минимаксная обработка информации. Москва : Энергоатомиздат, 1990. 212 с. ISBN 5-283-01504-1
15. Голубев Г.А. Параметрическое разложение (факторизация) матричной спектральной плотности и матричной передаточной функции в задачах оптимизации линейных систем с дискретным временем // АиТ. № 4. С. 29–42.
16. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. Москва : Наука, 1987. 736 с. URL: <https://djvu.online/file/MJmIl8DxPIJDL> (дата обращения: 20.03.2025).
17. Doyle J., Francis B., Tannenbaum A. Feedback control theory. New York : Macmillan Publ.; 1992. 227 p. ISBN 9780387854588
18. Веремей Е.И. Особенности решения задач среднеквадратичного синтеза в среде MATLAB // Труды II Всероссийской научной конференции «Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB». Москва : Ипу РАН, 2004. С. 864–883. ISBN 5-201-14971-5
19. Голубев Г.А., Муравлев В.Ф., Писарев О.В. Линейная фильтрация стационарных случайных процессов с непрерывным временем // Известия Российской академии наук. Техническая кибернетика. 1992. № 1. С. 141–147.
20. Голубев Г.А., Писарев О.В. Линейная фильтрация стационарных процессов с дискретным временем // Автоматика и телемеханика. 1992. № 7. С. 55–61. URL: <https://www.mathnet.ru/links/91b23279507370fef418909f58b4235a/at3339.pdf> (дата обращения: 20.03.2025).
21. Голубев Г.А. Факторизация матричной спектральной плотности и решение задачи линейной фильтрации многомерных случайных процессов // Известия Российской академии наук. Техническая кибернетика. 1989. № 2. С. 67–71.
22. Барабанов А.Е. Синтез минимаксных регуляторов. С-Петербург : Санкт-Петербургский университет. СПб, 1996. 224 с. ISBN 5-288-01531-7
23. Барабанов А.Е., Иванова А.В. Минимаксное управление дискретным объектом при смешанных возмущениях // Автоматика и телемеханика. 1991. № 4. С. 97–108. EDN: KSHGOJ
24. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. Москва : Наука, 1981. 448 с. 25.
25. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах. Беспорисковые методы. Москва : Наука, 1990. ISBN 5-02-014105-4
26. Барабанов А.Е. Синтез минимаксных регуляторов // Понtryгинские чтения X. Тезисы докладов. 1999. С. 307.
27. Розанов Ю.А. Стационарные случайные процессы. Изд. второе. Москва : Наука, 1990. 273 с. ISBN 5-02-014467-3
28. Ту Ю. Современная теория управления / под ред. В. Солодовникова. Москва : Машиностроение, 1971. 472 с.
29. Красовский Н.Н. Управление динамической системой. Москва : Наука, 1985. 520 с.
30. Голубев Г.А. Минимаксная линейная фильтрация динамических процессов с дискретным временем // Автоматика и телемеханика. 1984. № 2. С. 72–81.
31. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. Москва : Наука, 1976. 544 с. URL: <https://djvu.online/file/acB4ODGXeJeSf> (дата обращения: 20.03.2025).
32. Куржанский А.В. Управление и наблюдение в условиях неопределенности. Москва : Наука, 1977. 392 с.

References

1. Lipzer RS, Shiryaev AN. *Statistics of random processes: Nonlinear filtering and related issues*. Moscow : Nauka Publ.; 1974. (In Russ.) Available from: <https://djvu.online/file/3680ebqImcvng> (accessed: 20.03.2025).
2. Arató M. *Linear Stochastic Systems with Constant Coefficients*. Heidelberg: Springer Berlin Publ.; 1982. <https://doi.org/10.1007/BFb0043631>
3. Yemelyanova YuP. Management with iterative learning of a discrete system with a variable reference trajectory in conditions of uncertainty. *Automation and telemechanics*. 2022;(9):150–169. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S005231022090082> EDN: AJGQJE
4. Palamarchuk ES. On the optimal control problem for a linear stochastic system with an unstable state matrix unbounded at infinity. *Automation and Remote Control*. 2019;80(2):250–261. <https://doi.org/10.1134/S0005117919020048> EDN: OQBSCG
5. Korobochkin YuB. Minimax linear estimation of stationary random sequence in the presence of perturbation with limited dispersion. *Radio Engineering and Electronics*. 1983;(11):2186–2190. (In Russ.)
6. Pshenichny BN. *Necessary extreme conditions*. Moscow: Nauka Publ.; 1976. (In Russ.) Available from: <https://djvu.online/file/d90athkYPigIE> (accessed: 20.03.2025).
7. Shaikin ME. Design of optimal state controller robust to external disturbance for one class of nonstationary stochastic systems. *Automation and Remote Control*. 2015;76(7):1242–1251. <https://doi.org/10.1134/S0005117915070097>
8. Poznyak AS, Sebyakov GG, Semenov AV, Fedosov EA. *Theory of management: phenomenon, achievements, prospects, open problems*. Moscow: GosNIAS, IPU Publ.; 1990. (In Russ.) EDN: UWJKIP
9. Miller GB, Pankov AR. Minimax control of a process in a linear uncertain-stochastic system with incomplete

data. *Automation and Remote Control*. 2007;68(11):2042–2055. <https://doi.org/10.1134/S0005117907110124> EDN: LKMFDN

10. Pankov AR, Miller GB. Minimax linear recurrent filtering of indeterminately stochastic sequences by an integral criterion. *Information Processes*. 2001;1(2):150–166. (In Russ.) EDN: HRNMTB

11. Pankov AR, Semenikhin KV. Minimax identification of a generalized uncertain-stochastic linear model. *Automation and telemechanics*. 1998;(11):158–171. (In Russ.)

12. Pankov AR, Platonov EN, Semenikhin KV. Robust filtering of process in the stationary difference stochastic system. *Automation and Remote Control*. 2011;72(2):377–392. <https://doi.org/10.1134/S0005117911020147> EDN: OHRETX

13. Barabanov AE. Synthesis of adaptive H^∞ -optimal controllers. *Automation and telemechanics*. 1999(3):55–70. (In Russ.) EDN: OJYREL

14. Kurkin OM, Korobochkin YuB, Shatalov SA. *Minimax information processing*. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1990. (In Russ.) ISBN 5-283-01504-1

15. Golubev GA. Parametric expansion (factorization) of matrix spectral density and matrix transfer function in the optimization problems of linear discrete time systems. *Automation and Remote Control*. 1996;(9):29–41. EDN: MOWWGX

16. Lavrentiev MA, Shabat BV. *Methods of the theory of functions of a complex variable*. Moscow: Nauka Publ.; 1987. (In Russ.) Available from: <https://djvu.online/file/MJmIl8DxPIJDL> (accessed: 20.03.2025).

17. Doyle J, Francis B, Tannenbaum A. *Feedback control theory*. New York: Macmillan Publ.; 1992. ISBN 9780387854588

18. Veremey EI. Features of solving problems of root-mean-square synthesis in the MATLAB environment. *Proceedings of the II All-Russian Scientific Conference "Designing scientific and engineering applications in the MATLAB environment."* Moscow: Ipu RAS Publ.; 2004. p. 864–883. (In Russ.) ISBN 5-201-14971-5

19. Golubev GA, Muravlev VF, Pisarev OV. Linear filtration of stationary random processes with continuous time. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Technical cybernetics*. 1992;(1):141–147. (In Russ.)

20. Golubev GA, Pisarev OV. Linear filtration of stationary processes with discrete time. *Automation and telemechanics*. 1992(7):55–61. (In Russ.) Available from: <https://www.mathnet.ru/links/91b23279507370fef418909f58b4235a/at3339.pdf> (accessed: 20.03.2025).

21. Golubev GA. Factorization of the matrix spectral density and the solution of the problem of linear filtration of multidimensional random processes. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Technical cybernetics*. 1989;(2):67–71. (In Russ.)

22. Barabanov AE. *Synthesis of minimax regulators*. St. Petersburg: St. Petersburg University of St. Petersburg; 1996. (In Russ.) ISBN 5-288-01531-7

23. Barabanov AE, Ivanova AV. Minimax control of a discrete object with mixed perturbations. *Automation and Remote Control*. 1991;(4):97–108. EDN: KSHGOJ

24. Fomin VN, Fradkov AL, Yakubovich VA. *Adaptive control of dynamic objects*. Moscow: Nauka Publ.; 1981. (In Russ.)

25. Fradkov AL. *Adaptive management in complex systems. Searchless methods*. Moscow: Nauka Publ.; 1990. (In Russ.) ISBN 5-02-014105-4

26. Barabanov AE. Synthesis of minimax regulators. *Pontryaginsky readings of H. Abstracts of reports*. 1997. (In Russ.)

27. Rozanov YuA. *Stationary random processes*. Second edition. Moscow: Nauka Publ.; 1990. (In Russ.) ISBN 5-02-014467-3

28. Tu YuT. *Modern control theory*. New York: McGraw-Hill Publ.; 1964. Available from: <https://archive.org/details/moderncontrolthe0000touj> (accessed: 20.03.2025).

29. Krasovskiy N.N. *Dynamic system control*. Moscow: Nauka Publ.; 1985. (In Russ.)

30. Golubev GA. Minimax linear filtering of dynamic discrete time processes. *Automation and Remote Control*. 1984;45(2):203–211.

31. Kolmogorov AN, Fomin SV. *Elements of the theory of functions and functional analysis*. Moscow: Nauka Publ.; 1976. (In Russ.) Available from: <https://djvu.online/file/acB4ODGXeJeSf> (accessed: 20.03.2025).

32. Kurzhansky AV. *Control and surveillance in conditions of uncertainty*. Moscow: Nauka Publ.; 1977. (In Russ.)

Сведения об авторе

Сидоров Игорь Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент департамента математической кибернетики и информационных технологий, Московский технический университет связи и информатики, Российская Федерация, 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8А; eLIBRARY SPIN-код: 1676-7269, ORCID: 0000-0003-4691-4855; e-mail: igor8i2016@yandex.ru

About the author

Igor G. Sidorov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematical Cybernetics and Information Technologies, Moscow Technical University of Communications and Informatics, 8A Aviamotornaya St, Moscow, 111024, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 1676-7269, ORCID: 0000-0003-4691-4855; e-mail: igor8i2016@yandex.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-4-447-456

EDN: BLXPCY

Research article / Научная статья

Digital Modelling of Low-Frequency ECG Signals Denoising

Sinan V. Kurbanov^{ID}, Denis A. Andrikov^{ID}, Svetlana V. Agasieva^{ID}, Artem V. Iaroshenko^{ID}

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ ya.sinan@yandex.ru

Article history

Received: June 4, 2025

Revised: September 12, 2025

Accepted: September 25, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. The problem of low-frequency noise (baseline wander) in long-duration digital electrocardiogram (ECG) signals, which can distort critical diagnostic features such as the ST-segment and T-wave morphology, is considered. Digital filtering methods are studied with an emphasis on low-frequency noise extraction and correction using Chebyshev type II and Butterworth filters synthesized in Python. The results show that a 7th-order high-pass filter with a cutoff frequency of 1 Hz effectively isolates the zero-potential line, whereas the filtfilt function is essential to avoid phase distortions. The success of the filtering method depends on the rate of change of the zero-potential line, and further work is required to develop quantitative criteria for evaluating and correcting filter-induced distortions. The proposed approach aims to improve automated ECG analysis and reduce false alarms in cardiac-monitoring systems.

Keywords: ECG filtering, Butterworth filter, Chebyshev filter, cardiac signals, QRS complex

Authors' contribution

Kurbanov S.V. — mathematical modeling, visualization, writing; Andrikov D.A. — research concept; Agasieva S.V. — general guidance, validation; Iaroshenko A.V. — conducting hardware experiments. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Kurbanov SV, Andrikov DA., Agasieva SV, Iaroshenko AV. Digital modelling of low-frequency ECG signals denoising. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(4):447–456. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-447-456>

Цифровое моделирование снижения шума низкочастотных сигналов ЭКГ

С.В. Курбанов^{ID}, Д.А. Андриков^{ID}, С.В. Агасиева^{ID}, А.В. Ярошенко^{ID}

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ ya.sinan@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 4 июня 2025 г.

Доработана: 12 сентября 2025 г.

Принята к публикации: 25 сентября 2025 г.

Аннотация. Рассмотрена проблема низкочастотного шума — дрейфа базовой линии — в сигналах цифровой электрокардиограммы (ЭКГ) большой длительности, который может искажать критические диагностические признаки, такие как морфология ST-сегмента и Т-зубца. Изучены методы цифровой фильтрации с упором на извлечение и коррекцию

© Kurbanov S.V., Andrikov D.A., Agasieva S.V., Iaroshenko A.V., 2025



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

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

низкочастотных помех с использованием фильтров Чебышева II типа и Баттерворта, синтезированных на Python. Результаты исследования продемонстрировали, что фильтр верхних частот 7-го порядка с частотой среза 1 Гц эффективно изолирует линию нулевого потенциала, тогда как функция `filtfilt` необходима для предотвращения фазовых искажений. Успех метода фильтрации зависит от скорости изменения линии нулевого потенциала, и требуется дальнейшая разработка количественных критериев оценки и коррекции искажений, вызванных фильтром. Предлагаемый подход направлен на улучшение автоматизированного анализа ЭКГ и снижение ложных тревог в системах мониторинга сердца.

Ключевые слова: ЭКГ-фильтрация, фильтр Баттерворта, фильтр Чебышева, кардиосигналы, QRS-комплекс

Вклад авторов

Курбанов С.В. — математическое моделирование, визуализация, написание текста; *Андриков Д.А.* — концепция исследования; *Агасиева С.В.* — общее руководство, валидация; *Ярошенко А.В.* — проведение аппаратных экспериментов. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования

Курбанов С.В., Андриков Д.А., Агасиева С.В., Ярошенко А.В. Цифровое моделирование снижения шума низкочастотных сигналов ЭКГ // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 4. С. 447–456. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-447-456>

Introduction

The process of making a correct diagnosis has always been complex and challenging. Advances in medical technology have significantly improved this process. However, the increased flow of information has necessitated the introduction of automated diagnostic data processing tools into clinical practice. Cardiogram recordings can last tens of hours, and the number of heartbeats in such recordings can reach tens of thousands. Therefore, automated diagnostics, which harmoniously combines medical expertise with the machine-like precision of biological signal processing, is becoming increasingly important. At the same time, the need to extract diagnostically significant components from biological signals, i.e., filter these signals, is also growing.

Electrocardiogram (ECG) signals are often distorted by low-frequency fluctuations (baseline drift) caused by respiration (0.1–0.5 Hz), patient movement (motion artifacts), and poor electrode contact (skin impedance changes). These distortion disturbances can be critical for assessing ST-segment and T-wave morphology, which are important for diagnosing ST depression/elevation or certain arrhythmias (QT prolongation). A comprehensive

review and comparison of various digital filters for ECG noise reduction is presented below [1].

In medical practice, some filtering methods are often used, such as baseline removal without distorting ST/T waves and preserving ultra-low-frequency components for heart rate variability analysis. There are many low-frequency noise reduction methods: wavelet methods [2; 3], Kalman filtering [4; 5], and other methods [6; 7; 8].

In modern conditions, digital signal processing (DSP) is becoming increasingly widespread. In addition to the traditional fields of signal processing (television, radar, communications), new areas of application are emerging — speech analysis and telephony, medicine, image processing, and the analysis of various physical phenomena [9].

The development of computing technology has enabled the creation of reliable and inexpensive digital signal processing devices with high speed and quality. However, the expansion of the scope of application of digital signal processing to phenomena in the material world inevitably leads to the complexity of both the useful signal and the interference. The complication of the useful signal can be expressed, for example, in the instability of the time period, in the presence of short pulses of

significant amplitude, instability of the envelope shape and modulation frequency, and in other similar manifestations. Interference can be caused by a non-random process, the signal spectrum of which overlaps with the spectrum of the useful signal over a relatively wide frequency range [10]; interference can also be non-stationary, having a spectrum that varies over time; the interference spectrum can differ significantly from the well-studied spectra of widespread noise.

Therefore, the solution to one of the main problems of signal processing — the filtering problem — for natural, in particular biological, non-stationary signals of complex shape is non-trivial and requires the development of specific methods and corresponding digital filters.

1. Methods and Materials

1.1. Problem Statement

In this paper, the filtering problem is addressed for a long-duration digital cardiac signal (ECG), ranging from tens to tens of thousands of heartbeats. The objective is to maximize the ECG's adaptability to subsequent computer processing. Long-duration ECG signals contain unique information about the dynamics of cardiac activity during a person's daily activities. However, this information is distorted, for example, by electrode displacement due to movement or the appearance of potentials unrelated to cardiovascular activity at the electrode sites. Such extraneous influences on the ECG manifest themselves as noise and low-frequency oscillations in the zero potential line of the digital ECG. Examples of such interference in a single signal from a single ECG from the Russian Society of Holter Monitoring and Noninvasive Electrophysiology database (data availability: <http://rohmine.org/baza-dannykh-rokhmine/>) are shown in Figures 1–3.

Figure 1 shows a nearly constant shift of the zero potential line. Figures 2 and 3 show fairly slow oscillations of the zero potential line, lasting at least three heartbeats. The amplitude of these oscillations, as seen in Figure 3, can be several times greater than the QRS complex amplitude.

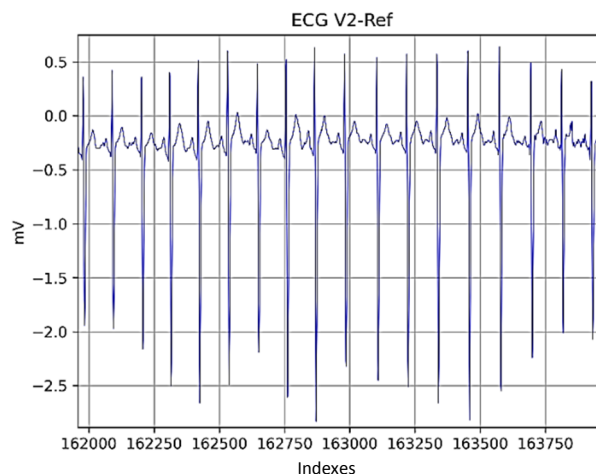


Figure 1. The zero-potential line offset
Source: by S.V. Kurbanov in the Python software

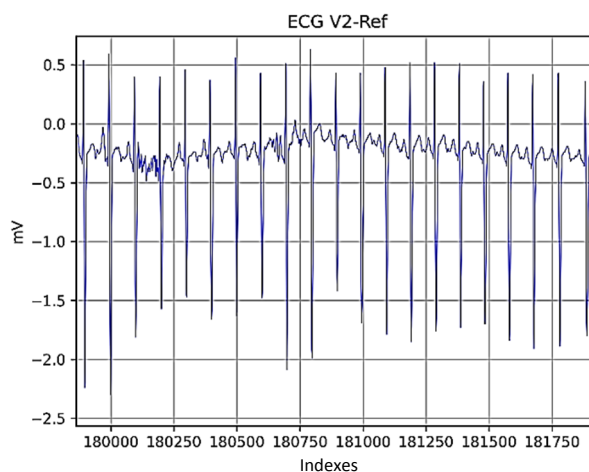


Figure 2. The zero-potential line small oscillations
Source: by S.V. Kurbanov in the Python software

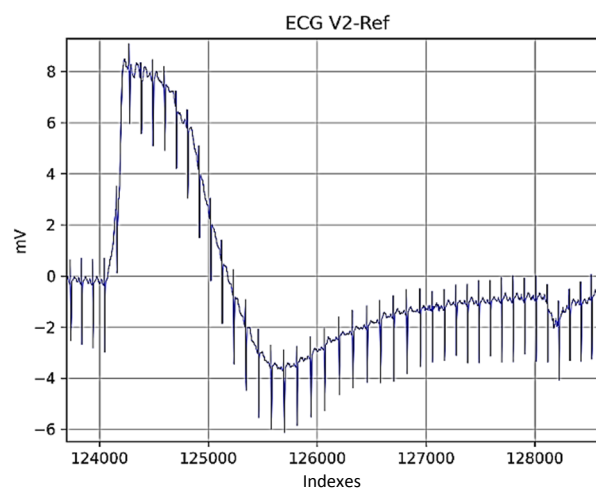


Figure 3. The zero-potential line large oscillations
Source: by S. V. Kurbanov in the Python software

Figure 2 also shows areas of high-frequency bursts with a period comparable to the duration of the QRS complex but significantly shorter than the duration of the P- and T-waves. However, there is insufficient evidence to unambiguously identify these high-frequency bursts as interference; it is possible that this noise characterizes processes occurring in the heart.

Furthermore, the powerful high-frequency spectrum of the short-duration QRS complex is a potential problem in ECG signal filtering. Since the QRS complex has unconditional diagnostic value, it must be preserved with minimal distortion throughout all ECG manipulations.

Due to the described ECG characteristics, the task of filtering the digital ECG signal can be reduced to finding a sequence of applying digital filters of certain types, with the aim of:

- identifying the deviation of the ECG zero potential line,
- numerically estimating the magnitude of this deviation,
- correcting the ECG zero potential line if the deviation magnitude allows such correction,
- removing an ECG section if the deviation magnitude does not allow its correction,
- identifying areas of high-frequency bursts, preserving the original ECG shape, in particular the QRS complex, during ECG manipulations.

1.2. Types of Digital Filters and Methods of Their Synthesis

Decomposing the ECG filtering problem suggests that low-frequency interference itself is a valuable information resource. Therefore, the proposed study applies a non-standard approach to filtering a digital biological signal, which involves explicitly and precisely identifying the interference, followed by correcting the useful signal by subtracting the identified interference. This approach is similar to adaptive filtering and is characterized by a virtually perfect tuning of the filter weighting coefficients. To achieve this tuning, the actual magnitude of the interference is subtracted from the processed signal with high accuracy at each sampling step, which should result in the isolation

of a virtually noise-free useful signal. If the interference is so significant that the isolation of the useful signal cannot be guaranteed, then the time interval during which the “bad” signal exists can be precisely defined, thereby eliminating it from further processing. The disadvantage of the proposed method is its limited applicability for signal processing in real time, due to the significant delay in isolating the interference and obtaining the filtered signal [11].

The theory of digital filters and the methods for their synthesis are well developed and described. The simplest method is to synthesize a digital filter based on an analog prototype, such a filter is stable provided the prototype is stable. The prototype is selected based on the required amplitude-frequency response (AFR) of the filter. Thus, to isolate the low-frequency component from the signal with maximum accuracy, the filter’s AFR in the passband must be as flat as possible. Of the main types of analog filters, the Butterworth filter and the inverse Chebyshev filter (also called the Chebyshev type 2 filter) have this property. The remaining filters have a slight unevenness in the passband, expressed as frequency response fluctuations of several decibels (AFR unevenness). Typically, in theory, an AFR of about 3 dB is allowed, which corresponds to a 30% signal attenuation; such attenuation is clearly unacceptable in the proposed filtering model.

Python was used to synthesize the digital filters, so the study and comparison of the frequency responses of the filters planned for use were performed using Python tools, using the numpy, scipy, and math libraries. The mathematical description is presented in sufficient detail in the literature, for example, [12]. Both prototype filters were synthesized as filters with an infinite impulse response (IIR filters) using the `iirfilter` function, which returns the numerator b and the denominator a of the filter transfer function:

```
b, a = iirfilter(Nf, wsr, rs = 40, btype =  
'lowpass', analog = True, ftype = 'cheby2')
```

according to specified parameters: **Nf** — the order of the filter, which determines the steepness of

the drop in its frequency response in the mid-frequency region between the pass and stop bands; **wsr** — circular cutoff frequency of the filter (ω), determined through the normal cutoff frequency according to the formula $[2 \cdot \pi \cdot \text{fsr}]$; **rs** = **40** — minimum attenuation in the stopband in dB, attenuation of 40 dB corresponds to attenuation by a factor of 100 times; **btype** = **'lowpass'** — filter type (low pass, high pass, band pass, etc.), here the low pass filter is specified; **analog** = **True** — a logical constant that determines the type of filter being synthesized; True corresponds to an analog filter, False to a digital filter; **ftype** = **'cheby2'** — filter type: Chebyshev Type II filter is specified here.

The comparison result between Chebyshev Type II and Butterworth filters is shown in Figure 4.

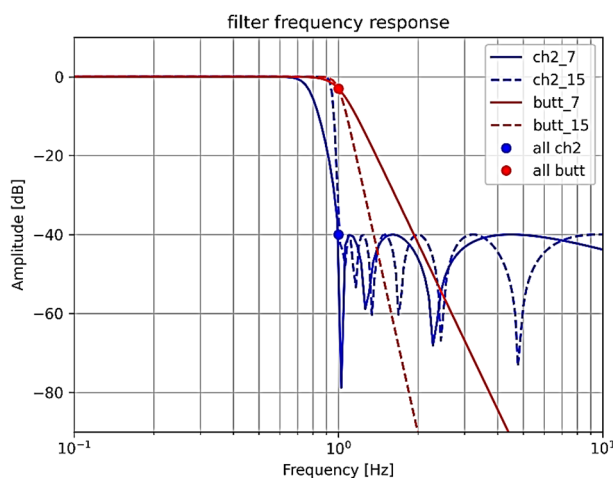


Figure 4. Comparison of Chebyshev type II and Butterworth filters
Source: by S.V. Kurbanov in the Python software

Frequency responses of both types of 7th and 15th order filters were constructed. Filter features are listed below:

1) The specified cutoff frequency for Butterworth filters characterizes the highest passband frequency, while for Type II Chebyshev filters it characterizes the lowest stopband frequency;

2) Butterworth filters are characterized by a smooth frequency response drop compared to Type II Chebyshev filters (confirming the theoretical conclusions); for a 7th-order filter, the specified

attenuation of 40 dB is achieved at a frequency of almost 2 Hz, and for a 15th-order filter, at a frequency of approximately 1.4 Hz, i.e., the spectrum of the filtered signal will contain a significant number of frequencies above the specified cutoff frequency;

3) Type II Chebyshev filters have a steeply falling frequency response; for a 7th-order filter, distortion will appear at a frequency of 0.7 Hz, and for a 15th-order filter, at a frequency of 0.9 Hz, i.e. In the filtered signal spectrum, a small number of frequencies below the specified cutoff frequency will be suppressed.

Thus, it can be concluded that it is advisable to use a Type II Chebyshev filter to isolate low-frequency interference from a cardiac signal. Only such filters will be considered below [13].

1.3. Study of Digital Filters Applied to the Problem of Filtering ECG Signals

Solving a filtering problem usually comes down to selecting filter parameters, which involves determining the cutoff frequency and filter order.

The filter cutoff frequency was determined based on well-known time and frequency characteristics of periodic processes occurring in the human body. The closest approximation to the heart rate is the respiratory rate, which normally is approximately 20 breaths per minute, corresponding to a frequency of 0.3 Hz. In adults, the heart rate ranges from 60 to 80 beats per minute, and a decrease in this rate below 60 beats per minute is considered to be bradycardia. However, trained individuals can normally have a lower heart rate (up to 45 to 50 beats per minute). Thus, the lower limit of the heart rate spectrum is located near a frequency of 0.75 Hz, and the expected frequency of the low-pass filter passband lies in the range of 0.3 to 0.7 Hz. Taking into account the nature of the frequency response of the Chebyshev filter of the 2nd type (Figure 4), the cutoff frequency of the low-pass filter for the proposed filtering method should be in the range of 0.2...0.8 Hz.

The limits for changing the filter order were determined primarily by means of a computational experiment, the design of which took into account

that the digital filter order determines the number of terms in the difference equation. On the one hand, increasing the filter order leads to a more accurate separation of the signal by frequency due to an increase in the slope of the characteristic. On the other hand, this increases the volume of calculations and the length of the data array required to solve the difference equation. Based on the fact that the number of data for one heart period at a sampling frequency of 200 Hz is approximately 100, it seems reasonable to limit the filter order to 15. An attempt to synthesize such filters in Python revealed the phenomenon of frequency response distortion in the passband depending on the filter order. Figure 5 shows the undistorted frequency response of a 5th-order filter with a cutoff frequency of 0.2 Hz, and Figure 6 shows the distorted frequency response of a 7th order filter with the same cutoff frequency.

This effect is evident at a cutoff frequency of 0.3 Hz above the 6th order; at cutoff frequencies of 0.4 Hz and 0.5 Hz, also above the 6th order; and at cutoff frequencies of 0.6–0.8 Hz, above the 7th order.

The filtering efficiency criterion for diagnostic purposes should characterize the conditions under which the filter application does not introduce significant distortions to the ECG at frequencies above $f_0 = 0.7$ Hz, as this frequency range is important for diagnostics. It follows that for significant distortions to occur in the diagnostic spectrum, the rise or fall time of the low-frequency component of the ECG must be approximately $1/f_0 \approx 1.4$ seconds. The increase in electrical potential during this time should be of the same order of magnitude as the average peak-to-peak amplitude of the QRS complex, i.e., approximately 4 mV. In other words, for the effective filter to be successfully implemented, the rise and fall slopes of the low-frequency component of the ECG must be no more than 3 mV/s. Refining this criterion requires significant additional research.

The results of the filter parameter study are summarized in the Table.

Thus, the maximum order of a low-pass filter in the 0.2–0.8 Hz range is 5, when implemented using Python without developing special functions.

For high-pass filters processing signals with frequencies of 300 oscillations per minute (5 Hz), no restrictions were found for filters of order no higher than 15. For example, the same methods are available in [3] only for wavelets.

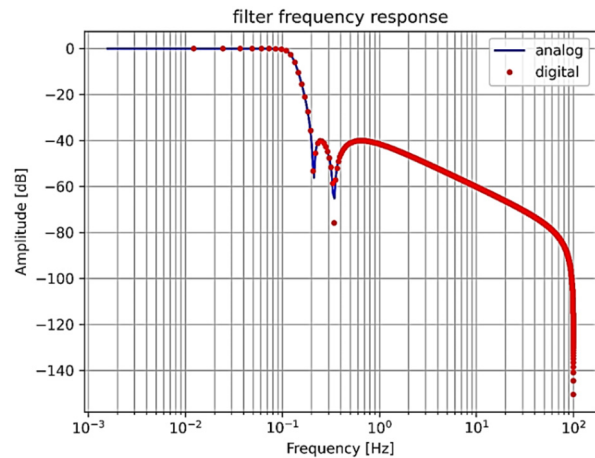


Figure 5. AFC of 5th order filter with cutoff frequency 0.2 Hz
Source: by S.V. Kurbanov in the Python software

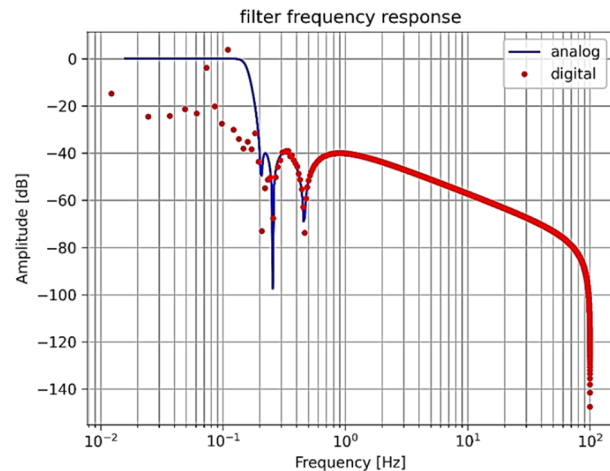


Figure 6. AFC of 7th order filter with cutoff frequency 0.2 Hz
Source: by S.V. Kurbanov in the Python software

The Effect of the Cutoff Frequency of Chebyshev Filters of the Second Kind on the Allowable Filter Order

Cutoff frequency, Hz	The maximum filter order	Efficiency criterion for the front or decline of the low-frequency component, mV/s
0.2	5	3
0.3	5	3
0.4...0.5	5	3
0.6...0.8	6	3

Source: by S.V. Kurbanov

2. Results of Applying Synthesized Filters to Real ECG Signals

Filtering and detrending ECG time series have their advantages, such as simplifying the process of ECG recognition and analysis. Typically, the obtained data is either analyzed immediately or subjected to further processing. However, such methods have limitations: for example, baseline shifts can cause changes in the amplitude of the waves and segments of the ECG, as well as the appearance of false elements that can be mistakenly interpreted as pathology. Everything depends on how much the potential of the ECG readings changes compared to the original data, since it can be one value at the peak line and another at the zero level line, which also affects diagnostics [14].

The result of applying a 5th-order filter to a real cardiac signal (one branch of V2) is shown in Figure 7; a fragment of the cardiogram is shown. Two algorithms from the **scipy.signal** library implemented in Python were tested: 1) **lfilter**, which implements filtering from beginning to end, with the filtered signal having a phase shift; 2) **filtfilt**, which implements filtering with start-end-start return, which corrects phase shifts. For the proposed filtering method, the phase shift is a critical parameter. Without compensation for this shift, the method is fundamentally ineffective. In this case, the phase shift was equal to five heartbeat periods, which for the pattern in Figure 7 corresponds to approximately a quarter of the period of slow oscillations.

Clearly, only filtering with phase shift compensation merits further study. The result of subtracting the extracted low-frequency component from the original cardiac signal is shown in Figures 8, 9, and 10.

Figure 8 shows the zero potential line correction for small and slow changes. It is evident that these changes are successfully compensated, with the ECG remaining in the positive potential region, except for the Q and S waves.

Figure 9 shows the zero potential line correction for significant and rapid changes. In this case correction is unachievable near areas of abrupt changes, such as near index 124200 in Figure 9.

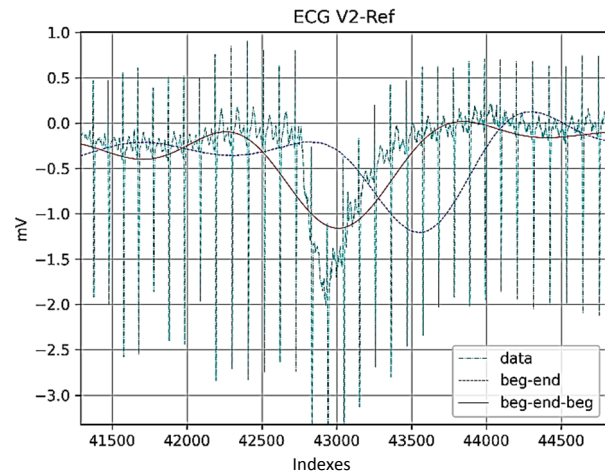


Figure 7. The result of filtering a real cardiogram

Source: by S.V. Kurbanov in the Python software

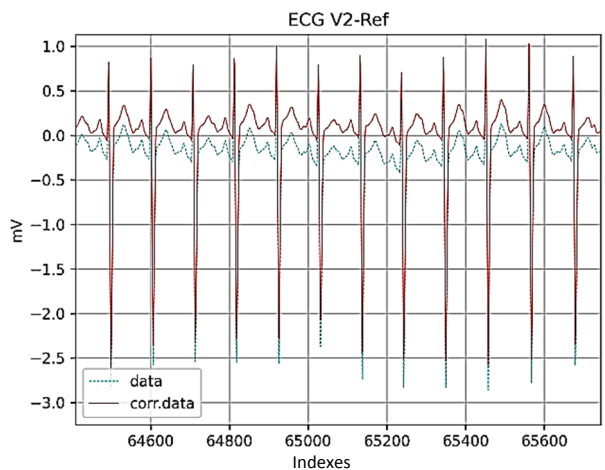


Figure 8. Correction of small slow changes

Source: by S.V. Kurbanov in the Python software

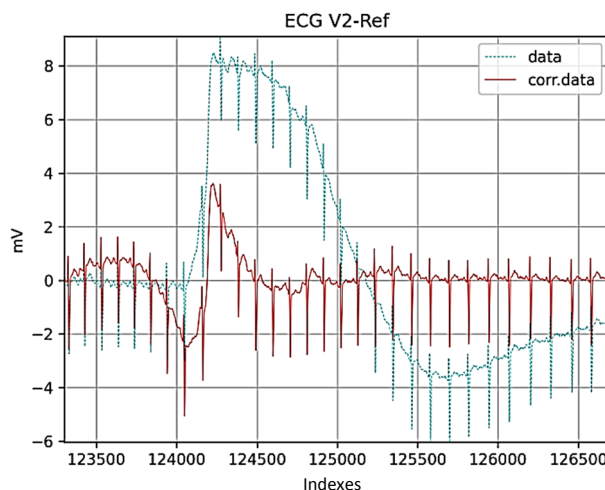


Figure 9. Correction of large rapid changes

Source: by S.V. Kurbanov in the Python software

A visual comparison of the original and filtered ECG data allows us to formulate a hypothesis that the factor determining the success of the proposed filtering method is the rate of change of the original signal. This is indicated by the successful correction of a large deviation in the range of 125,500...126,500 indices, whereas no correction is observed at the steep front of the change in the zero potential line at 124,200 indices. On the contrary, the filter introduces additional distortions into the zero potential line. A visual signal enhancement method based on the digital wavelet transform can provide an accurate result [15], but in the case of a wavelet, we urgently need to find the best wavelet mother function and determine the correct scale to make the figure suitable for study. Therefore, the proposed method, compared to the digital wavelet transform, appears to be a significantly simpler means of improving the cardiac signal. To eliminate distortions, studies were conducted to modify the proposed digital filtering method. Due to the distortion of the zero potential line, an attempt was made to extract this line in a form as close as possible to that observed in the original signal. To achieve this, a seventh-order high-pass filter with a cutoff frequency of 1 Hz was applied to the original cardiac signal, followed by calculating the difference between the original and filtered signals. The result is shown in Figure 10.

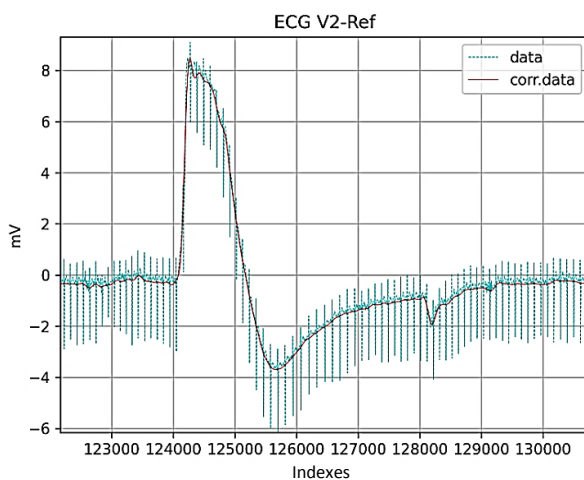


Figure 10. The result of the selection of a low-frequency component by a high-frequency filter

Source: by S.V. Kurbanov in the Python software

Here, the distortion of the useful signal at the steep leading edge at indices 124100–124250 is also observed, which confirms the previously proposed hypothesis.

Both studies aim to remove noise and baseline drift from ECG signals while preserving diagnostically important features (QRS complex, ST segment, T-wave).

This study evaluates the performance of Chebyshev II (inverse Chebyshev) and Butterworth filters for baseline drift correction, with an emphasis on minimizing phase distortion through zero-phase filtering. The results are compared with the work of Chavan [16] and Kaur [17], who analyzed Chebyshev I and II filters for ECG noise reduction. In this study, Chebyshev Type II filters (7th order, 1 Hz cutoff) and Butterworth filters implementing zero-phase filtering were tested using Python's `scipy.signal.filtfilt` to remove time-domain artifacts. The Chebyshev Type II filter demonstrated superior performance in baseline correction due to a sharper stopband rolloff, while Butterworth filters exhibited a slower rolloff, resulting in ST segment distortion. Phase alignment was found to be critical, with zero-phase filtering reducing time-shift artifacts to less than five heartbeat periods.

The curve obtained as the result of the filtering process almost exactly replicates the zero-potential line for a locally selected heartbeat period. Clearly, the corrected useful signal, possibly with minor distortions, is obtained immediately as a result of filtering (Figure 11).

Chavan [16] compared Chebyshev Type I (flat passband) and Type II (flat stopband) filters, measuring performance through improved signal-to-noise ratio (SNR) and QRS complex preservation. The Chebyshev Type II filter outperformed Type I filters in noise removal and QRS energy preservation, consistent with the results of the present study. Both studies highlight the limitations of Butterworth filters in preserving diagnostic features.

The computational complexity of the proposed algorithm can be estimated as follows. The difference equation for each point of the original signal is solved in a fixed number of operations, with a solution complexity of $O(1)$. For filtering

a digital ECG with a length of n samples, the algorithm has a linear complexity of $O(n)$. Compared to neural network algorithms, they have a minimum quadratic complexity of $O(n^2)$, as shown in [17]. The proposed method requires significantly fewer computational resources than neural network algorithms.

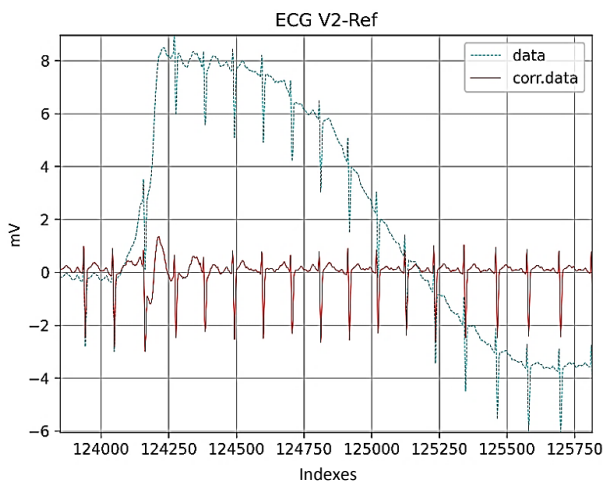


Figure 11. The result of the selection of a useful signal by a high-frequency filter

Source: by S.V. Kurbanov in the Python software

The results show that Chebyshev Type II filters are optimal for ECG noise reduction, providing a balance between effective noise suppression and minimal distortion of critical signal components. Zero-phase filtering is essential for maintaining signal integrity, especially for automated diagnostics and long-term monitoring. Future work may explore hybrid methods, such as combining wavelet transforms with Chebyshev filters, to remove non-stationary noise and further improve real-time processing.

Conclusion

On balance, this study confirms the advantage of Chebyshev type II filters for ECG signal noise reduction, consistent with previous studies. The emphasis on zero-phase implementation provides practical insights for clinical applications, ensuring accurate interpretation of ECG data. Limitations on the filter order are determined depending on the cutoff frequency: for cutoff frequencies of

0.2–0.8 Hz, it is recommended to use a filter of no higher than 5th order, and for higher cutoff frequencies, no higher than 7th order.

To minimize distortion, the absence of phase distortion is critical, so in Python, the `filtfilt` function from the `scipy.signal` library should be used, which implements two forward and reverse passes through the signal value array.

Comparison of the results of using high-pass and low-pass filters to extract the zero-potential line allows a clear choice in favor of using a 7th-order high-pass filter with a cutoff frequency of 1 Hz. The filtered signal represents an ECG signal with a zero-potential line correction, and the difference between the original and filtered signals represents the zero-potential line itself. A hypothesis was formulated and tested that the factor determining the success of the proposed filtering method is the rate of change of the zero-potential line of the original signal. To numerically estimate the magnitude of distortions introduced by the filter and correct these distortions, it is necessary to develop a distortion assessment criterion and an algorithm for calculating this criterion.

Future work: classification of drift sources (respiration, movement, and pathology) and integration with clinical ECG software without the need for manual adjustments. This will improve automated diagnostics (e.g., AI-based ECG interpretation) and reduce the number of false alarms in cardiac monitoring systems.

References

1. Chieng TM, Hau Y, Omar Z. The study and comparison between various digital filters for ECG denoising. *2018 IEEE-EMBS Conference on Biomedical Engineering and Sciences (IECBES)*. Sarawak, Malaysia, 2018:226–232. <https://doi.org/10.1109/iecbes.2018.8626661>
2. Hramov AE, Koronovskii AA, Makarov VA, Maksimenko VA, Pavlov AN, Sitnikova E. Brief Tour of Wavelet theory. *Springer Series in Synergetics*. 2021; 15–73. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75992-6_2
3. Singh BN, Tiwari AK. Optimal selection of wavelet basis function applied to ECG signal denoising. *Digital Signal Processing*. 2006;16(3):275–287. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2005.12.003>
4. Vullings R, Vries BD, Bergmans J. An adaptive kalman filter for ECG signal enhancement. *IEEE Trans-*

actions on Biomedical Engineering. 2011;58(4):1094–1103. <https://doi.org/10.1109/tbme.2010.2099229>

5. Hesar HD, Mohebbi M. An adaptive kalman filter bank for ECG denoising. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 2021;25(1):13–21. <https://doi.org/10.1109/jbhi.2020.2982935> EDN: YEKL CI

6. Rao DrBR, Priyanka K, Raju BB, Deepak S. EMD and wavelet-based ECG signal denoising and QRS complex detection. *International journal of scientific research in engineering and management*. 2024;08(04):1–7. <https://doi.org/10.17148/IJIREICE.2015.3203>

7. Liu F, Xu Y, Yao Y. Highly efficient low noise solutions in ECG signals. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2246(1):012030. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2246/1/012030> EDN: YFFCQI

8. Ahmad RUS, Khan W, Khan MS, Cheung P. Emerging rapid detection methods for the monitoring of cardiovascular diseases: Current trends and future perspectives. *Materials Today Bio*. 2025;32:01663. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2025.101663>

9. Djigan VI. *Adaptive signal filtering: theory and algorithms*. Moscow: Technosphaera Publ.; 2013 (In Russ.) ISBN 978-5-94836-342-4

10. Andrikov DA, Kurbanov SV. Algorithmic Support for Spectral Processing of Cardiograms. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(2):111–120. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-2-111-120> EDN: HMIHLA

11. Meyer CR, Keiser HN. Electrocardiogram baseline noise estimation and removal using cubic splines and state-space computation techniques. *Computers and Biomedical Research*. 1977;10(5):459–470. [https://doi.org/10.1016/0010-4809\(77\)90021-0](https://doi.org/10.1016/0010-4809(77)90021-0)

12. Sörnmo L, Laguna P. Electrocardiogram (ECG) signal processing. *Wiley encyclopedia of biomedical engineering*. 2006;2:1298–1313. <https://doi.org/10.1002/9780471740360.ebs1482>

13. Chouhan VS, Mehta SS. Total Removal of Baseline Drift from ECG Signal. *2007 International Conference on Computing: Theory and Applications (ICCTA'07)*; 2007 Mar 05–07; Kolkata, India, 2007:512–515. <https://doi.org/10.1109/iccta.2007.126>

14. Chatterjee S, Thakur RS, Yadav RN, Gupta L, Raghuvanshi DK. Review of noise removal techniques in ECG signals. *IET Signal Processing*. 2020;14(9):569–590. <https://doi.org/10.1049/iet-spr.2020.0104> EDN: AYCXC R

15. Chieng TM, Hau YW, Bin Omar Z, Lim CW. Qualitative and quantitative performance comparison of ECG noise reduction and signal enhancement method based on various digital filter designs and discrete Wavelet transform. *International Journal of Computing and Digital Systems*. 2020;9(4): 553–565. <https://doi.org/10.12785/ijcds/090404> EDN: IQGPZL

16. Chavan M, Agarwala R, Uplane MD. Comparative study of Chebyshev I and Chebyshev II filter used for noise reduction in ECG signal. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*. 2008;2(1):1–17.

17. Kaur M, Singh B, Seema. Comparison of different approaches for removal of baseline wander from ECG signal. *International Conference on Welding Engineering and Technology (ICWET)*. 2011 Feb 25–26; Mumbai, Maharashtra, India. New York: Association for Computing Machinery. 2011:1290–1294. <https://doi.org/10.1145/1980022.1980307>

18. Chuchupal VY. Ways to reduce the computational complexity of neural language models. *Speech Technologies*. 2020;(3–4):16–29 (In Russ.) EDN: NOPIOU

About the authors

Sinan V. Kurbanov, Postgraduate student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-код: 1127-5326; ORCID: 0009-0005-6632-9102; e-mail: ya.sinan@yandex.ru

Denis A. Andrikov, Ph.D. (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; eLIBRARY SPIN-code: 8247-7310; ORCID: 0000-0003-0359-0897; e-mail: andrikovdenis@mail.ru

Svetlana V. Agasieva, Ph.D. (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9696-6864; ORCID: 0000-0002-9089-1411; e-mail: agasieva-sv@rudn.ru

Artem V. Iaroshenko, Postgraduate student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-8379-622X; e-mail: 1142240338@pfur.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-4-457-465

EDN: DAUKAY

Научная статья / Research article

Разработка и применение новых цифровых инструментов для организации охраны труда при строительстве Амурского газоперерабатывающего завода

И.В. Степанян^{a,b} , П.А. Курочкин^c 

^a Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^b Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Российская Федерация

^c Научно-исследовательский проектный институт по переработке газа, Москва, Российская Федерация

 neurocomp.pro@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 7 июля 2025 г.

Доработана: 16 сентября 2025 г.

Принята к публикации: 2 октября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0019.

Аннотация. Цель исследования — разработка и описание программного обеспечения для организации охраны труда в процессе строительства Амурского газоперерабатывающего завода (АГПЗ). Описанная методика основана на оценке рисков и выборе мероприятий по управлению организацией строительно-монтажных работ. Система управления профессиональными рисками разработана и внедрена в практику в четвертом квартале 2020 г. В 2022 г. на основе сформированной базы идентифицированных опасностей и мер управления была проведена работа по автоматизации процесса идентификации опасностей, формирования карт управления рисками и ознакомления работников с содержанием этих карт. Разработка и внедрение предложенной методики привели к значительному снижению показателей нарушений здоровья работников АГПЗ как в части профессиональных заболеваний, так и в части травматизма. Полученное в результате проведенного исследования программное обеспечение для оценки и управления профессиональными рисками рекомендуется для практического применения в процессе возведения нефтехимических и газохимических производств.

Ключевые слова: управление профессиональными рисками, эргатические системы, объекты нефте- и газохимии, АГПЗ

Вклад авторов

Степанян И.В. — разработка программного обеспечения, подготовка рукописи; Курочкин П.А. — разработка и применение программного обеспечения, внедрение методики на предприятии, подготовка рукописи и получение практических результатов. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования

Степанян И.В., Курочкин П.А. Разработка и применение новых цифровых инструментов для организации охраны труда при строительстве Амурского газоперерабатывающего завода // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 4. С. 457–465. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-457-465>



Development and Experience of Using Digital Tools for the Organization of Labor Protection During the Construction of the Amur Gas Processing Plant

Ivan V. Stepanyan^{a,b} , Pavel A. Kurochkin^c 

^a RUDN University, Moscow, Russian Federation

^b Institute of Machines Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^c Scientific Research Institute for Gas Processing, Moscow, Russian Federation

 neurocomp.pro@gmail.com

Article history

Received: July 7, 2025

Revised: September 16, 2025

Accepted: October 2, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Funding

The work was carried out at the expense of the State Assignment, the code (cipher) of the scientific topic assigned by the founder (organization) FFGU-2024-0019.

Abstract. The purpose of this study is to develop and describe software for the organization of labor protection during the construction of the Amur Gas Processing Plant (AGPP). The described methodology is based on risk assessment and selection of measures for managing the organization of construction and installation works. The professional risk management system was developed and put into practice in the 4th quarter of 2020. In 2022, based on the established database of identified hazards and their management measures, work was carried out to automate the process of hazard identification, as well as the formation of risk management maps and the familiarization of employees with the contents of these maps. The development and implementation of the proposed methodology has led to a significant reduction in the rates of health disorders of AGPP employees both in terms of work-related diseases and injuries. The software developed as a result of the conducted research for professional risk assessment and management is recommended for practical use in the construction of new petrochemical and gas chemical plants.

Keywords: professional risk management, ergatic systems, oil and gas chemistry facilities, AGPP

Authors' contribution

Stepanyan I.V. — software development, manuscript preparation; Kurochkin P.A. — software development and application, implementation of methodology in the enterprise, preparation of the manuscript and obtaining practical results. Both the authors read and approved the final version of the article.

For citation

Stepanyan IV, Kurochkin PA. Development and experience of using digital tools for the organization of labor protection during the construction of the Amur gas processing plant. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(4):457–465. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-457-465>

Введение

Амурский газоперерабатывающий завод (АГПЗ), на котором планируется производство и переработка природного газа с целью извлечения из него пропана, бутана, пентан-гексановой фракции и гелия, строится в Свободненском районе Амурской области в Дальневосточном федеральном округе. Регион характеризуется суровыми погодными условиями и муссонными дождями. В период пика работ (апрель —

октябрь 2021 г.) ежедневно на площадке находилось $32,9 \pm 1,4$ тыс. человек. Более 95 % работников — мужчины в возрасте от 18 до 56 лет, средний возраст $34,5 \pm 3,6$ года. Доля женщин на объекте строительства составляла не более 5 %, их возраст от 25 до 60 лет, средний возраст $43,8 \pm 5,6$ года. Мужчины заняты на строительных работах на открытом воздухе, женщины — в помещениях, обеспечивая питание и уборку, реже административное сопровождение. Персонал работает вахтовым методом

от 2 до 6 месяцев и проживает в блочно-модульных общежитиях, в комнатах от 2 до 8 человек.

Нарушения здоровья в результате получения травмы при выполнении трудовых обязанностей отслеживают на основе динамики показателей травматизма. Индекс частоты происшествий с потерей рабочего времени LTIF² (англ. Lost Time Injury Frequency Rate) рассчитывается как количество травм с потерей рабочего времени на один миллион отработанных часов (в расчет включаются как случаи летального травматизма, так и случаи с потерей трудоспособности от одного и более дней).

Индекс летального травматизма FAR (англ. Fatal Accident Rate) — показывает частоту аварий со смертельным исходом. В таблице приведены значения показателей LTIF и FAR, достигнутые АО «НИПИГАЗ» при строительстве объектов нефте- и газохимии в 2015–2023 гг. Компании, которые привлекают на основе договора подряда другие юридические лица (подрядные организации) к выполнению работ, включали случаи травматизма работников подрядных организаций в общее количество зарегистрированных несчастных случаев при расчете индекса LTIF.

Показатели, достигнутые АО «НИПИГАЗ»* при строительстве объектов нефте- и газохимии, 2015–2023 гг. (по данным платформы HSE Days, декабрь 2023 г.)

Период	Наименование проекта	Заказчик	Отработано времени, млн чел.-час.	LTIF по проекту	FAR по проекту
2015–2019	Проект по строительству объектов заводского хозяйства	ООО «Запсибнефтехим»	44,7	0,58	4,47
2016–2020	Проект по строительству комбинированной установки переработки нефти	ОАО «Газпром нефть — МНПЗ»	32,3	0,06	0,0
2016–2025	Проект по строительству Амурского газоперерабатывающего завода	ООО «Газпром Переработка Благовещенск»	430,3	0,29	1,27
2017–2021	Проект по строительству объектов заводского хозяйства	ОАО «Газпром Нефть — ОНПЗ	16,6	0,34	0,00
2020–2025	Проект по строительству объектов заводского хозяйства	АО «СИБУР»	8,3	1,32	0

Источники: корпоративная статистика АО «НИПИГАЗ»

* IOGP Safety Performance Indicators. URL: <https://www.iogp.org/bookstore/product-category/safety/> (дата обращения: 08.12.2024).

The indicators achieved by JSC NIPIGAZ* during the construction of oil and gas chemistry facilities, 2015–2023 (according to the HSE Days platform, December 2023)

Period	Project name	Customer	Time worked, million people per hour	LTIF for the project	FAR by project
2015–2019	A project for the construction of factory facilities	Zapsibneftekhim LLC Refining Blagoveshchensk, SIBUR JSC	44.7	0.58	4.47
2016–2020	The project for the construction of a combined oil refining unit	Gazprom Neft — MNPZ JSC	32.3	0.06	0.0
2016–2025	Amur Gas Processing Plant Construction Project	Gazprom Pererabotka Blagoveshchensk LLC	430.3	0.29	1.27
2017–2021	A project for the construction of factory facilities	Gazprom Neft — ONPZ	16.6	0.34	0.00
2020–2025	A project for the construction of factory facilities	SIBUR JSC	8.3	1.32	0

Source: by corporate statistics of JSC NIPIGAZ

* IOGP Safety Performance Indicators. URL: <https://www.iogp.org/bookstore/product-category/safety/> (accessed: 08.12.2024).

² IOGP Safety Performance Indicators. URL: <https://www.iogp.org/bookstore/product-category/safety/> (accessed: 08.12.2024).

Данные 1995–2023 гг. показывают практически двукратное увеличение количества дней нетрудоспособности на один случай травматизма как в целом по России (рост с 27 до 64 дней), так и в строительстве — с 31 до 64 дней [1]. Таким образом, несмотря на меньшее число происшествий, тяжесть последствий увеличивается. То есть, несмотря на среднее

улучшение показателей динамики снижения производственного травматизма, имеет место увеличение количества дней нетрудоспособности на одного пострадавшего. На рис. 1 показана динамика показателя LTIF по сектору промышленность по данным IOGP³ в сравнении с корпоративными данными АО «НИПИГАЗ» в 2014–2020 гг.

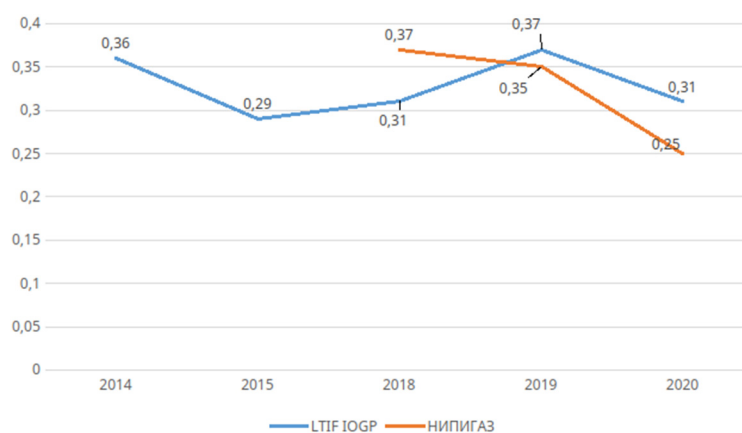


Рис. 1. Динамика показателя LTIF по сектору промышленность (IOGP) в сравнении с корпоративными данными АО «НИПИГАЗ», 2014–2020 гг.
Источник: корпоративная статистика АО «НИПИГАЗ»

Figure 1. Dynamics of the LTIFR indicator for the industry sector (IOGP) in comparison with the corporate data of JSC NIPIGAZ, 2014–2020
Source: by corporate statistics of JSC NIPIGAZ

Тема управления профессиональными рисками на промышленных предприятиях широко обсуждается в научной литературе. Реализация стандартов по оценке и управлению профессиональным риском для здоровья работников и комплекс приоритетных мер по интеграции инструментов оценки условий труда и профессиональных рисков описана в [2; 3]. Применительно к работникам строительной отрасли в производственных помещениях и на угледобывающем предприятии риски рассмотрены и обсуждены в [4–8]. Управление профессиональными рисками на предприятиях при эксплуатации грузоподъемного оборудования проанализировано в [9]. Управление профессиональными

рисками как система социально-экономических мероприятий, направленных на предупреждение болезней и охрану здоровья работников в Республике Беларусь, обсуждено в [10]. Место производственного контроля и оценка опасностей в системе управления профессиональными рисками рассмотрены в [11; 12]. Обзор литературы по оценке прогнозирования и управления рисками для здоровья работающих приведен в [13]. Современные подходы по организации и проведению работ по оценке и снижению профессиональных и производственных рисков обсуждены в [14]. Система автоматизации процессов оценки профессиональных рисков с учетом влияния человеческого фактора разработана в

³ International Association of Oil and Gas Producers — международная ассоциация производителей нефти и газа, собирает общемировую отраслевую статистику.

[15], модель оценки профессиональной компетенции для управления профессиональными рисками на предприятии разработана в [16].

1. Программа расчета групповых показателей потери слуха

Для управления рисками развития профессиональной тугоухости была разработана программа, которая учитывает стаж, возраст и уровень шума на рабочем месте (рис. 2). Программа была создана на основе методики, раз-

работанной Федеральным государственным бюджетным научным учреждением «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова» в рамках НИР «Научное обоснование совершенствования критериев оценки (априорной и апостериорной) и приемлемости профессионального риска у работающих в условиях шума и других виброакустических факторов с учетом современных риск-ориентированных моделей профилактики» [17–18].

Группа работников	Результаты расчета риска потери слуха			Результаты расчета риска признаков воздействия шума		
	Избыточный (атрибутивный) риск, ER(gr), %	Относительный риск, RR(gr), %	Экологическая доля, EF(gr), %	Избыточный (атрибутивный) риск, ER(gr), %	Относительный риск, RR(gr), %	Экологическая доля, EF(gr), %
Мужчины 30 лет и более						
Возраст в настоящее время, лет						
55						
Возраст начала работы, лет						
18 years						
Стажевый эквивалентный уровень звука AL(A), дБ						
80						
Рассчитать						

Рис. 2. Фрагмент интерфейса программы расчета групповых показателей потери слуха
И с т о ч н и к: выполнено И.В. Степаняном, П.А. Курочкиным

Group of workers	Loss risk calculation results			Results of the risk calculation for signs of exposure		
	Excess (attributive) risk, ER(gr), %	Relative risk, RR(gr), %	Etiological fraction, EF(gr), %	Excess (attributive) risk, ER(gr), %	Relative risk, RR(gr), %	Etiological fraction, EF(gr), %
Men 30 years and older						
Current age:						
55 years						
Age at which employment commenced:						
18 years						
Equivalent sound level AL(A), dB						
80						
Calculate						

Figure 2. Fragment of the interface of the program for calculating group indicators of hearing loss
S o u r c e: by I.V. Stepanyan, P.A. Kurochkin

2. Программа по управлению профессиональными рисками на основе картирования опасностей и рисков на рабочем месте

Для управления рисками авторами была разработана специализированная программа,

интерфейс которой приведен на рис. 3. После заполнения карты опасностей программа выдает индивидуальный документ для ознакомления работников (под роспись) с инструкциями по технике безопасности и рекомендациями по организации труда.

№ карты / Map No.	Выполняемые работы (выберите подходящие варианты) Work to be performed (select the appropriate options)	
30	☐	Работа на высоте / Work at heights
31	☐	Работа в полевых условиях и отдельных труднодоступных местах / Work in field conditions and remote, hard-to-reach locations
32	☐	Работа в акватории, в том числе на заболоченных участках / Work in water areas, including marshy areas
33	☐	Работа на воде и вблизи водоемов / Work on water and near water bodies
34	☐	Работа на действующей производственной площадке (АН, ПНР и др.) / Work at active production sites (AN, PNR, etc.)
35	☐	Работа на строительной площадке (территория заказчика) / Work on a construction site (customer's premises)
36	☐	Работа в темное время суток / Work during night hours
37	☐	Логистика (сопровождение крупнотоннажного груза) / Logistics (escorting heavy cargo)
38	☐	Эвакуация при пожаре / Evacuation in case of fire
39	☐	Нештатные аварийные ситуации / Emergency situations
40	☐	Занятия спортом, связанные с работодателем / Sports activities related to the employer
41	☐	Работа в электроустановках до 1000 В / Work in electrical installations up to 1000 V
42	☐	Работа в электроустановках выше 1000 В / Work in electrical installations above 1000 V
43	☐	Работа на тепловых энергоустановках / Work in thermal power plants
44	☐	Работа по эксплуатации и обслуживанию лифтов / Work related to the operation and maintenance of lifts
45	☐	Работы погрузочно-разгрузочные и размещение груза / Loading, unloading and cargo placement
46	☐	Уборка и ремонт помещений / Cleaning and repair of premises
47	☐	Подключение и организация рабочих мест / Connection and organization of workplaces

Рис. 3. Фрагмент интерфейса программы по управлению профессиональными рисками на основе картирования опасностей и рисков на рабочем месте

И с т о ч н и к: выполнено И.В. Степаняном, П.А. Курочкиным

Figure 3. Fragment of the interface of an occupational risk management program based on hazard and risk mapping in the workplace

S o u r c e: by I.V. Stepanyan, P.A. Kurochkin

3. Результаты

В результате реализации комплекса мероприятий, направленных на автоматизацию процессов снижения профессиональных рисков при

строительстве АГПЗ, был проведен детальный анализ итоговых показателей уровня частоты травм с потерей трудоспособности (LTIF), представленных на рис. 4. Анализ динамики данного показателя за период с 2022 по 2024 г. демон-

стрирует выраженный тренд на его снижение, что свидетельствует об эффективности внедренного программного обеспечения для повышения уровня безопасности труда в процессе строительно-монтажных работ.

Таким образом, применение новых цифровых инструментов для управления профессиональными рисками позволило существенно уменьшить количество случаев ухудшения здоровья сотрудников АГПЗ, связанных как с профессиональными заболеваниями, так и с травмами.

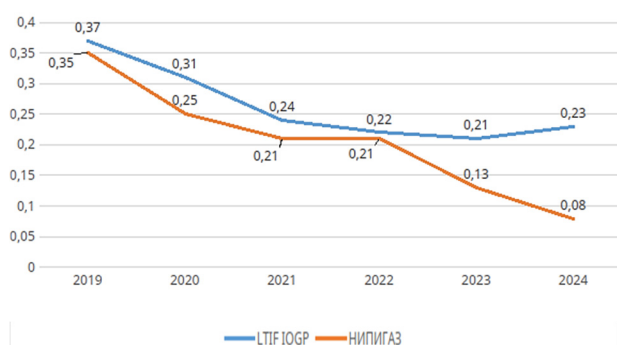


Рис. 4. Динамика показателя LTIF по сектору промышленности (IOGP) в сравнении с корпоративными данными АО «НИПИГАЗ», 2019–2024 гг.

Источники: корпоративная статистика АО «НИПИГАЗ»

Figure 4. Dynamics of the LTIF indicator for the industry sector (IOGP) in comparison with the corporate data of JSC NIPIGAZ, 2019–2024

Source: by corporate statistics of JSC NIPIGAZ

Заключение

Представленное решение на основе разработанных цифровых инструментов по автоматизации управления рисками показало эффективность для обеспечения безопасности труда при строительстве Амурского газоперерабатывающего завода и позволяет перейти от традиционного управления безопасностью выполнения работ к управлению профессиональными рисками. Разработанные и внедренные программные инструменты оценки и контроля профессиональных рисков, созданные в ходе исследования, рекомендуются к использованию в процессе строительства новых нефтехимических и газохимических предприятий.

Список литературы

1. Агошков А.И., Лесовский Б.Ф., Стрижеусов С.Н., Курочкин П.А. Анализ производственного травматизма, профессиональных заболеваний и условий труда в России // Наукосфера. 2022. № 4-2. С. 248–255. EDN: BTMQLQ
2. Бухтияров И.В., Кузьмина Л.П., Головкова Н.П., Чеботарев А.Г., Лескина Л.М., Котова Н.И., Хелковский-Сергеев Н.А. Реализация положений стандартов методологической платформы по оценке и управлению профессиональным риском для здоровья работников // Медицина труда и промышленная экология. 2022. Т. 62. № 5. С. 278–284. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-5-278-284> EDN: BMOIAL
3. Бухтияров И.В., Кузьмина Л.П., Головкова Н.П., Измерова Н.И., Лескина Л.М., Котова Н.И., Соболев В.П. Разработка комплекса приоритетных мер по интеграции инструментов оценки условий труда для формирования уровней профессиональных рисков // Медицина труда и промышленная экология. 2022. Т. 62. № 9. С. 558–565. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-9-558-565> EDN: WPQRDI
4. Сбитнева Д.А., Дьяченко А.Ю., Томаровицено О.Н. Профессиональные риски работников строительной отрасли // Россия молодая : материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 20–23 апреля 2021 года, Кемерово, 2021. С. 10116.1–10116.6. EDN: XALCQH
5. Пузырев А.М., Козырева Л.В. Разработка методики оценки профессиональных рисков в строительстве // Безопасность техногенных и природных систем. 2022. № 1. С. 9–17. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-1-9-17> EDN: MHEALH
6. Бузииков Ш.В., Суханов А.С. Оценка профессиональных рисков в производственных помещениях ООО «Гасзнак» // Вестник науки. 2022. Т. 1. № 11. С. 312–322. EDN: QVTQAO
7. Каракеян В.И., Харламов Н.Р., Рябышенков А.С. Оценка профессиональных рисков в технологических помещениях на предприятии микроэлектроники // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2021. Т. 26. № 3–4. С. 265–272. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-265-272> EDN: WHLIPA
8. Тюленева Т.А., Кабанов Е.И. Использование риск-ориентированного подхода в управлении профессиональными рисками взрыва метана и пыли на угледобывающем предприятии // Техника и технология горного дела. 2021. № 2. С. 13–32. <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2021-2-13-32> EDN: IFDAOX
9. Таранушина И.И., Попова О.В. Анализ управления профессиональными рисками на предприятиях при эксплуатации грузоподъемного оборудования // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 4. С. 76–82. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-4-76-82> EDN: ANBBBBR

10. Рыбина Т.М., Гоменюк А.Н., Сушинская Т.М., Макеев В.В., Карпеко И.К., Кисель И.В., Гинько И.В., Семёнов И.П., Василевский С.С., Саранцев В.В. Управление профессиональными рисками, как система социально-экономических мероприятий, направленных на предупреждение болезней и охрану здоровья работников в Республике Беларусь // Медицина труда и промышленная экология. 2021. Т. 61. № 11. С. 715–719. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-11-715-719> EDN: DPVCYP

11. Игнатова Е.Н., Андреева Е.Е., Симонова Н.И., Низяева И.В. Место производственного контроля в системе управления профессиональными рисками // Здоровье населения и среда обитания — ЗНИСО. 2014. № 9 (258). С. 27–31. EDN: SZGFMN

12. Елин А.М., Шумилин В.К. Оценка опасностей и профессиональных рисков // Энергобезопасность и энергосбережение. 2021. № 2 (98). С. 5. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-2-5-11> EDN: MLGNRQ

13. Яцына И.В., Сухова А.В., Преображенская Е.А., Егорова А.М. Оценка прогнозирования и управления рисками для здоровья работающих (обзор литературы) // Гигиена и санитария. 2022. Т. 101. № 10. С. 1249–1254. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-10-1249-1254> EDN: YRGCT

14. Легкий Н.М., Шумилин В.К., Елин А.М. Современные подходы по организации и проведению работ по оценке и снижению профессиональных и производственных рисков. 2021. 512 с. ISBN 978-5-00121-358-1 EDN: QJLBQS

15. Зонова Н.О., Сердюк В.С., Фомин А.И. Разработка цифрового инструмента для автоматизации процессов оценки профессиональных рисков с учётом влияния человеческого фактора // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2022. № 2. С. 45–59. EDN: TTHLYD

16. Еремеев М.Е. Модель профессиональной компетенции для оценки профессиональных рисков // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. Серия: Педагогика, психология. 2022. № 1. С. 48–59. <https://doi.org/10.18323/2221-5662-2022-1-14-21> EDN: SNWLLA

17. Бухтияров И.В., Денисов Э.И., Курьеров Н.Н., Прокопенко Л.В., Булгакова М.В., Хахилева О.О. Совершенствование критериев потери слуха от шума и оценка профессионального риска // Медицина труда и промышленная экология. 2018. № 4. С. 1–9. EDN: YWRKFE

18. Прокопенко Л.В., Курьеров Н.Н., Лагутина А.В. НИР № 0408-2022-000. Научное обоснование совершенствования критериев оценки (априорной и апостериорной) и приемлемости профессионального риска у работающих в условиях шума и других виброакустических факторов с учетом современных риск-ориентированных моделей профилактики. Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова, 2024.

References

1. Agoshkov AI, Lesovsky BF, Strizheusov SN, Kurochkin PA. Analysis of industrial injuries, professional diseases and conditions of work IN Russia. *Naukosphere*. 2022;(4-2):248–255. (In Russ.) EDN: BTMQLQ

2. Bukhtiyarov IV, Kuzmina LP, Golovkova NP, Chebotarev AG, Leskina LM, Kotova NI, Khelkovsky-Sergeev NA. Implementation of the provisions of the methodological platform standards for the assessment and management of occupational health risk for employees. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2022;62(5):278–284. (In Russ.) <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-5-278-284> EDN: BMOIAL

3. Bukhtiyarov IV, Kuzmina LP, Golovkova NP, Izmerova NI, Leskina LM, Kotova NI, Sobolev VP. Development of a set of priority measures for the integration of tools for assessing working conditions for the formation of occupational risk levels. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2022;62(9):558–565. (In Russ.) <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-9-558-565> EDN: WPQRDI

4. Sbitneva DA, Dyachenko AYU, Tomarovshchenko ON. Occupational risks of construction industry workers. *Russia is Young. Collection of materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical conference with international participation*. April 20–23, 2021, Kemerovo, 2021. p. 10116.1–10116.6. (In Russ.) EDN: XALCQH

5. Puzyrev AM, Kozyreva LV. Development of a methodology for assessing professional risks in construction. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2022;(1): 9–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-1-9-17> EDN: MHEALH

6. Buzikov ShV, Sukhanov AS. Professional risk assessment in production premises of Gasznak LLC. *Science Bulletin*. 2022;1(11):312–322. (In Russ.) EDN: QVTQAO

7. Karakeyan VI, Kharlamov NR, Ryabyshnikov AS. Occupational Risk Assessment in Engineering Spaces at the Microelectronics Enterprise. *Proceedings of Universities. Electronics*. 2021;26(3-4):265–272. (In Russ.) <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-265-272> EDN: WHLIPA

8. Tyuleneva TA, Kabanov EI. The use of a risk-based approach in the management of professional risks of methane and dust explosion on coal mining enterprise. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2021;(2):13–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2021-2-13-32> EDN: IFDAOX

9. Taranushina II, Popova OV. Analysis of the occupational risk management at the enterprises during lifting equipment operation. *Occupational Safety in Industry*. 2021;(4):76–82. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-4-76-82> EDN: ANBBBR

10. Rybina TM, Gomenyuk AN, Sushinskaya TM, Makeev VV, Karpeko IK, Kisel IV, Ginko IV, Semenov IP,

Vasilevsky SS, Sarantsev VV. Occupational risk management as a system of socio-economic measures aimed at preventing diseases and protecting the health of workers in the Republic of Belarus. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2021;61(11):715–719. (In Russ.) <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-11-715-719> EDN: DPVCYP

11. Ignatova E, Andreeva EE, Simonova NI, Nizyaeva IV. Place of production control in occupational risk management system. *Public Health and Life Environment – PH&LE*. 2014;(9):27–31. (In Russ.) EDN: SZGFMN

12. Elin AM, Shumilin VK. Hazard and occupational risk assessment. *Energy Safety and Energy Economy*. 2021;(2):5. (In Russ.) <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-2-5-11> EDN: MLGNRQ

13. Yatsyna IV, Sukhova AV, Preobrazhenskaya EA, Egorova AM. Scientific and methodological aspects of assessment, forecasting and risk management for the health of workers (Literature review). *Hygiene and Sanitation, Russian Journal*. 2022;101(10):1249–1254. (In Russ.) <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-10-1249-1254> EDN: YRGCFY

14. Light NM, Shumilin VK, Elin AM. *Modern approaches to the organization and conduct of work to assess and reduce occupational and industrial risks*. 2021. (In Russ.) ISBN 978-5-00121-358-1 EDN: QJLBQS

15. Zonova NO, Serdyuk VS, Fomin AI. Development of a digital tool for automation of professional risk assessment processes taking into account the influence of the human factor. *Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety)*. 2022;(2):45–59. (In Russ.) EDN: TTHLYD

16. Eremeev ME. A professional competence model for occupational risk assessment. *Science Vector of Togliatti State University. Series: Pedagogy, Psychology*. 2022;(1):48–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.18323/2221-5662-2022-1-14-21> EDN: SNWLLA

17. Bukhtiyarov IV, Denisov EI, Kuryerov NN, Prokopenko LV, Bulgakova MV, Khakhileva OO. Improvement of noise-induced hearing loss criteria and occupational risk assessment. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2018;(4):1–9. (In Russ.) EDN: YWRKFE

18. Prokopenko LV, Kuryerov NN, Lagutina AV. *Research and development No. 0408-2022-000. Scientific substantiation of the improvement of assessment criteria (a priori and a posteriori) and the acceptability of occupational risk among workers working in conditions of noise and other vibroacoustic factors, taking into account modern risk-oriented prevention models*. Scientific Research Institute of Occupational Medicine named after Academician N.F. Izmerov, 2024. (In Russ.)

Сведения об авторах

Степанян Иван Викторович, кандидат технических наук, доктор биологических наук, профессор кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ведущий научный сотрудник, Институт машиноведения имени А.А. Благонравова Российской академии наук, Российская Федерация, 101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4; eLIBRARY SPIN-код: 5644-6735; ORCID: 0000-0003-3176-5279; e-mail: neurocomp.pro@gmail.com

Курочкин Павел Александрович, руководитель департамента охраны труда, промышленной безопасности и экологии, Научно-исследовательский проектный институт по переработке газа (АО «НИПИГАЗ»), Российская Федерация, 117342, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, корп. 1; eLIBRARY SPIN-код: 7036-9075; ORCID: 0009-0006-8900-1975; e-mail: pavel.a.kurochkin@yandex.ru

About the authors

Ivan V. Stepanyan, Ph.D, Sc.D (biol.), Professor of the Department of Mechanics and Management Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; Leading Researcher, Institute of Machines Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences, 4 Maliy Kharitonievsky lane, Moscow, 101000, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 5644-6735; ORCID: 0000-0003-3176-5279; e-mail: neurocomp.pro@gmail.com

Pavel A. Kurochkin, Head of the Department of Occupational Safety, Industrial Safety and Ecology, Scientific Research Institute for Gas Processing (JSC “NIPIGAS”), 65 Profsoyuznaya St, bldg 1, Moscow, 117342, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 7036-9075; ORCID: 0009-0006-8900-1975; e-mail: pavel.a.kurochkin@yandex.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-4-466-471

EDN: DPKHZD

Краткое научное сообщение / Short scientific report

Технология блокчейн для поддержки принятия управленческих решений

Т.П. Талла Фонганг

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ thierrytalla@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 20 мая 2025 г.

Доработана: 4 августа 2025 г.

Принята к публикации: 30 сентября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Технология блокчейн привлекает внимание не только в финансовом секторе, но и в государственном и корпоративном управлении. Ее фундаментальные свойства — децентрализация, неизменяемость и прозрачность данных — позволяют обеспечить новый уровень доверия и эффективности в процессах принятия управленческих решений. Учитывая возрастающую цифровизацию и стремление к повышению прозрачности, многие организации и государственные органы рассматривают блокчейн как инструмент решения накопившихся проблем, включая контроль транзакций, документооборота и логистических цепочек. Исследованы ключевые возможности и ограничения использования технологии блокчейн для поддержки принятия управленческих решений на государственном и корпоративном уровне. Определены перспективные направления ее дальнейшего внедрения. В качестве эмпирической базы использовались отечественные и зарубежные научные публикации, официальные отчеты международных организаций, результаты пилотных проектов и выпускных квалификационных работ. Методы исследования включали контент-анализ, сравнительный анализ кейсов и систематизацию полученных данных для формирования выводов и рекомендаций. Проведенное исследование показало, что блокчейн способен повысить прозрачность и надежность управленческих процессов, ускорить документооборот и укрепить доверие стейкхолдеров. Однако существуют организационные и правовые барьеры, а также технические сложности (масштабируемость, интеграция с наследуемыми системами), которые препятствуют масштабному внедрению. Для эффективного применения блокчейна в поддержке управленческих решений требуется комплексный подход: совершенствование нормативно-правовой базы, развитие человеческого капитала и формирование цифровой инфраструктуры.

Ключевые слова: распределенный реестр, цифровое управление, прозрачность, государственное управление, корпоративное управление

Для цитирования

Талла Фонганг Т.П. Технология блокчейн для поддержки принятия управленческих решений // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 4. С. 466–471. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-466-471>

© Талла Фонганг Т.П., 2025



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

Blockchain Technology for Managerial Decision Support

Thierry P. Talla Fongang 

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ thierrytalla@gmail.com

Article history

Received: May 20, 2025

Revised: August 4, 2025

Accepted: September 30, 2025

Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Abstract. Blockchain technology has gained attention not only in the financial sector but also in public and corporate governance. Its core attributes — decentralization, immutability, and data transparency — can foster a new level of trust and efficiency in managerial decision-making processes. Given the ongoing digital transformation and the growing demand for transparency, many state organizations and governmental bodies consider blockchain a tool for addressing pressing issues in transaction control, document flow, and supply chain management. The key opportunities and limitations of using blockchain technology to support management decision-making at the government and corporate levels are explored. The empirical base included Russian and international scientific publications, official reports by international organizations, and findings from pilot projects and final qualification papers. Research methods encompassed content analysis, comparative analysis of case studies, and systematic data processing to form conclusions and recommendations. The study revealed that blockchain can enhance the transparency and reliability of managerial processes, expedite document flow, and strengthen stakeholder trust. However, organizational and legal barriers, as well as technical challenges (scalability, integration with legacy systems), hinder widespread adoption. Effective application of blockchain in managerial decision-making demands a comprehensive approach: improving the regulatory framework, developing human capital, and establishing a robust digital infrastructure.

Keywords: distributed ledger, digital governance, transparency, public administration, corporate governance

For citation

Talla Fongang TP. Blockchain technology for managerial decision support. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(4):466–471. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-466-471>

Введение

Технология блокчейн, ставшая изначально основой для криптовалют (Bitcoin, Ethereum), в последние годы все чаще рассматривается как инновационная платформа для управления [1]. Суть блокчейна в том, что данные хранятся в распределенной сети узлов, а каждая запись связана с предыдущей путем криптографических методов [2]. Это открывает широкие возможности для обеспечения прозрачности, неизменяемости и надежной фиксации транзакций.

Во многих организациях процесс принятия решений осложняется недостатком доверия, непрозрачным документооборотом, неэффективной координацией между отделами и высоким риском ошибок. Блокчейн позволяет хра-

нить все изменения в системе в виде последовательной «цепочки блоков», что усложняет фальсификацию данных и делает процесс принятия решений более объективным [3]. Государственное управление также испытывает интерес к распределенным реестрам: внедрение блокчейна в госуслуги и административные процедуры рассматривается как способ повысить подотчетность и снизить коррупционные риски.

Однако, несмотря на потенциал, широкое внедрение блокчейна связано с барьерами: отсутствие полноценных правовых норм, сложности интеграции с унаследованными системами и нехватка специалистов. Настоящая работа посвящена рассмотрению того, как эти факторы влияют на применение блокчейна в управленче-

ских решениях и какие возможности для преодоления данных препятствий существуют.

Цель исследования — проанализировать ключевые преимущества и ограничения блокчейн-технологии в контексте принятия управленческих решений в государственных и корпоративных структурах, а также выработать рекомендации по ее эффективному внедрению. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- 1) изучить литературные источники и эмпирические данные по опыту применения блокчейна в управлении;
- 2) определить, в каких областях блокчейн наиболее эффективен для управления (с точки зрения прозрачности, скорости принятия решений, снижения транзакционных издержек);
- 3) выявить основные технические, правовые и организационные ограничения, замедляющие масштабное внедрение;
- 4) сформулировать рекомендации по преодолению выявленных барьеров и обозначить перспективы дальнейших исследований.

1. Материалы и методы

В работе применялись следующие подходы и методы:

■ *контент-анализ* научных статей, аналитических отчетов и выпускных квалификационных работ [4; 5] для систематизации упоминаний о блокчейн-технологиях и практическом опыте их использования;

■ *сравнительный анализ* кейсов внедрения блокчейна в государственных и корпоративных проектах [6–8], что позволило выявить универсальные черты, влияющие на успех или неудачу проектов;

■ *синтез полученных результатов* в виде рекомендаций для управленцев, стремящихся внедрить блокчейн в процессы принятия решений.

Для иллюстрации были отобраны показательные примеры (Россия, Грузия, Эстония, частный сектор США), позволяющие оценить многообразие сценариев применения технологии.

Теоретические основы применения блокчейна

Прежде чем перейти к конкретным результатам, кратко рассмотрим базовые преимущества и особенности блокчейна, делающие его привлекательным для управленческих решений [9; 10]:

■ *децентрализованное хранение данных*: отсутствие единого центрального узла повышает отказоустойчивость и снижает риск злоупотреблений властью;

■ *неизменяемость записей*: каждая операция проходит верификацию сетью, а изменение ранее зарегистрированных блоков крайне затруднительно [11];

■ *прозрачность*: пользователи сети могут видеть хронологию транзакций, что улучшает контроль и качество аудита;

■ *автоматизация с помощью смарт-контрактов*: при наступлении заданных условий алгоритм выполняется самостоятельно, исключая «человеческий фактор» [12].

2. Результаты и обсуждение

2.1. Управление цепочками поставок

В глобальных цепочках поставок, где участвуют десятки контрагентов, блокчейн позволяет автоматически фиксировать движение товаров на каждом этапе [7; 15]. Это снижает мошенничество, ускоряет проверку качества и повышает доверие между партнерами.

2.2. Документооборот и идентификация

Государственные услуги, связанные с выдачей сертификатов, регистрацией недвижимости, идентификацией граждан, становятся значительно прозрачнее с внедрением блокчейна [9; 16]. Уменьшается бумажная бюрократия, сроки принятия решений сокращаются, а возможность подделки документов практически исключается.

2.3. Преимущества блокчейна

Основные преимущества блокчейна в контексте управленческих процессов обобщены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

**Основные преимущества блокчейна в управлении /
The main advantages of blockchain in management**

Преимущество / Advantage	Описание / Description
Прозрачность / Transparency	Все записи видны участникам сети / All entries are visible to network members
Неизменяемость / Immutability	Сложность внести изменения в уже подтвержденные блоки / The difficulty of making changes to already confirmed blocks
Безопасность / Safety	Криптографические механизмы защищают данные / Cryptographic mechanisms protect data
Сокращение посредников / Reducing intermediaries	Отсутствие центрального узла уменьшает транзакционные издержки / The absence of a central node reduces transaction costs
Повышение эффективности решений / Improving the efficiency of solutions	Автоматизация ряда процедур (смарт-контракты, проверка данных) / Automation of a number of procedures (smart contracts, data verification)

Источник: выполнено Т.П. Талла Фонганг /
Source: by T.P. Talla Fongang

2.4. Технические и организационные барьеры. Масштабируемость

Публичные блокчейны (Bitcoin, Ethereum) имеют ограничения по пропускной способности [14; 15]. В условиях массовых управленческих процессов это может стать узким местом. Частные (private) блокчейны отчасти решают проблему, но снижают уровень децентрализации.

2.5. Нехватка компетенций

Компании и госорганы нередко испытывают дефицит специалистов, способных одно-

временно понимать технические аспекты и бизнес-процессы [16; 17]. Это замедляет внедрение и повышает стоимость проектов.

2.6. Сравнение успешных и неудачных кейсов

Несколько примеров внедрения блокчейна в государственном и корпоративном секторах с отражением ключевых факторов успеха или провала приведены в табл. 2.

Взаимосвязи между технологическими элементами блокчейна и управленческими процессами отражены на рисунке.

Таблица 2 / Table 2

**Примеры внедрения блокчейна и ключевые факторы успеха/неудачи /
Examples of blockchain Implementation and Key Success/Failure factors**

Пример / Example	Сектор / Sector	Результат / Result	Ключевые факторы / Key Factors
Грузия (реестр) / Georgia (registry)	Госуправление / Public administration	Успешная реализация / Successful implementation	Политическая поддержка, Bitfury, прозрачная нормативная база / Political support, Bitfury, transparent regulatory framework
Эстония (e-Residency) / Estonia (e-Residency)	Госуправление / Public administration	Успешная интеграция / Successful integration	Продвинутая e-инфраструктура, доверие граждан / Advanced e-infrastructure, citizens' trust
США (частные пилоты) / USA (private pilots)	Корпоративный / Corporate	Различные результаты / Different results	Недостаток единых стандартов, правовая неопределенность / Lack of uniform standards, legal uncertainty
Проект X (условно) / Project X (conditional)	Корпоративный / Corporate	Заккрытие проекта / Closing the project	Отсутствие согласованной стратегии, нехватка специалистов / Lack of a coordinated strategy, lack of specialists

Источник: выполнено Т.П. Талла Фонганг /
Source: by T.P. Talla Fongang



Схематическое представление взаимодействия блокчейна и управленческих процессов

Источник: выполнено Т.П. Талла Фонганг

Schematic representation of the interaction of blockchain and management processes

Source: by T.P. Talla Fongang

2.7. Научная новизна и практическая значимость

Работа комплексно рассматривает влияние блокчейна на различные аспекты принятия управленческих решений: от документооборота до логистики. В отличие от ряда исследований, фокусирующихся только на технической стороне [13; 11], данное исследование акцентирует внимание на организационных и правовых факторах.

Результаты могут быть использованы государственными органами и корпорациями при разработке дорожных карт внедрения блокчейна. Данные о барьерах и факторах успеха могут лечь в основу методических рекомендаций для руководителей проектов.

Заключение

Блокчейн позволяет повысить прозрачность и доверие в процессах принятия решений, выступая надежным инструментом хранения и верификации данных.

1. Наиболее перспективные сферы для внедрения: управление цепочками поставок, государственные реестры, электронный документооборот, смарт-контракты.

2. Основные барьеры: правовая неопределенность, технические ограничения (масштабируемость, скорость транзакций), нехватка профессионалов, неготовность организаций к кардинальному пересмотру бизнес-процессов.

3. Рекомендации: необходимо развивать нормативно-правовую базу, формировать сеть центров компетенций по блокчейну, внедрять гибкие модели корпоративного управления, интегрирующие распределенный реестр с существующими системами.

4. Перспективы исследований: углубленный анализ экономической эффективности блокчейн-проектов, разработка прикладных методик выбора платформы, формирование консолидированных международных стандартов.

Подводя итог вышесказанному, можно отметить, что блокчейн-технология уже доказала свою ценность в отдельных кейсах, но для широкого внедрения требуется системная проработка правовых и организационных аспектов, а также развитие цифровых навыков у управленцев и технических специалистов.

Будущие исследования могут быть направлены на разработку методических рекомендаций по выбору блокчейн-платформ в зависимости от специфики организации и оценку экономической эффективности таких проектов.

References / Список литературы

1. Beck R, Czepluch JS, Lollike N, Malone S. Blockchain — the gateway to trust-free cryptographic transactions. *Proceedings of the Twenty-Fourth European Conference on Information Systems (ECIS)*. 2016. Available from: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:3655580> (accessed: 12.03.2025)
2. Li J, Greenwood D, Kassem M. Blockchain in the built environment and construction industry: A systematic review, conceptual models and practical use cases. *Automation in Construction*. 2019;102:288–307. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.005>
3. Tapscott D, Tapscott A. *Blockchain revolution: how the technology behind bitcoin is changing money, business, and the world*. Penguin, 2016. ISBN 9781101980149
4. Shamrin MYu, Galkina MV. The role of blockchain in improving public administration. *RUDN Journal of Law*. 2023;27(4):956–968. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2337-2023-27-4-956-968> EDN: KGLPFL
Шамрин М.Ю., Галкина М.В. Роль блокчейна в совершенствовании публичного управления // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Юридические науки. 2023. Т. 27. № 4. С. 956–968. <http://doi.org/10.22363/2313-2337-2023-27-4-956-968> EDN: KGLPFL
5. Mendling J, Weber I, Van der Aalst W. et al. Blockchains for Business Process Management — Challenges and Opportunities. *ACM Transactions on Management Information Systems*. 2018;9(1):4. <http://doi.org/10.1145/3183367>
6. Swan M. *Blockchain: Blueprint for a new economy*. O'Reilly Media, Inc.; 2015. ISBN 978-1491920497
7. Crosby M, Pattanayak P, Verma S, Kalyanaraman V. Blockchain technology: Beyond bitcoin. *Applied Innovation*. 2016;(2):6–19. Available from: <https://scet.berkeley.edu/wp-content/uploads/AIR-2016-Blockchain.pdf> (accessed: 12.03.2025)
8. Casino F, Patsakis C, Dasaklis TK. A systematic literature review of blockchain-based applications: current status, classification and open issues. *Telematics and Informatics*. 2019;36:55–81. <http://doi.org/10.1016/j.tele.2018.11.006> EDN: WXGKCE
9. Pilkington M. Blockchain technology: principles and applications. *Research Handbook on Digital Transformations*. Edward Elgar Publ.; 2016. P. 225–253. <http://doi.org/10.4337/9781784717766.00019>
10. Yeoh P. Regulatory issues in blockchain technology. *Journal of Financial Regulation and Compliance*. 2017;25(2):196–208. <http://doi.org/10.1108/JFRC-08-2016-0068>
11. Nakamoto S. *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*. 2008. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3440802>
12. Buterin V. *Ethereum: A next-generation smart contract and decentralized application platform*. 2013. Available from: <https://courses.cs.duke.edu/spring23/compsi512/papers/ethereum.pdf> (accessed: 12.03.2025).
13. Zheng Z, Xie S, Dai H, Chen X, Wang H. An overview of blockchain technology: Architecture, consensus, and future trends. *2017 IEEE international congress on big data (BigData congress)*. 2017 Jun 25–30; Honolulu, HI, USA, 2017. P. 557–564. <http://doi.org/10.1109/BigData Congress.2017.85>
14. Krylov AA. Blockchain in public policy and governance. *Social Policy and Social Partnership*. 2021;(6): 422–431. (In Russ.) <http://doi.org/10.33920/pol-01-2106-03> EDN: ZQARWH
Крылов А.А. Блокчейн в государственной политике и управлении // Социальная политика и социальное партнерство. 2021. № 6. С. 422–431. <http://doi.org/10.33920/pol-01-2106-03> EDN: ZQARWH
15. Raymaekers W. Cryptocurrency Bitcoin: Disruption, challenges and opportunities. *Journal of Payments Strategy & Systems*. 2015;9(1):30–46. <http://doi.org/10.69554/FBUJ3107>
16. Ivanitsky DK, Kononov AS, Alekvanov VG, Kurbanov AE. Application of blockchain technology in the field of government administration. *Natural-Humanitarian Studies*. 2023;3(47):402–407. (In Russ.) EDN: JPOFSS
Иваницкий Д.К., Коновалов А.С., Алевранов В.Г., Курбанов А.Е. Применение технологии блокчейн в сфере государственного управления // Естественно-гуманитарные исследования. 2023. № 3 (47). С. 402–407. EDN: JPOFSS
17. Somekh A. Blockchain skills gap: Identifying the competencies required for future digital government. *Government Information Quarterly*. 2022;39(3):101714. <http://doi.org/10.1016/j.giq.2022.101714>

Сведения об авторе

Талла Фонганг Тьерри Патрик, аспирант кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0009-6579-8205; e-mail: thierrytalla@gmail.com

About the author

Thierry P. Talla Fongang, Postgraduate student of the Department of Innovation Management in Industrial Sectors, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-6579-8205; e-mail: thierrytalla@gmail.com



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-4-472-480

EDN: DPMIXG

Научная статья / Research article

Применение генетического алгоритма для задач проектирования магистральных газопроводов

В.К. Лобанов^{ORCID}, М.С. Кондрашина^{ORCID}✉, Ш.М. Гаджиев^{ORCID}

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ 1132236536@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 2 июля 2025 г.

Доработана: 22 сентября 2025 г.

Принята к публикации: 30 сентября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии
конфликта интересов.

Аннотация. Исследован вопрос оценки нового подхода для процесса проектирования маршрута трубопровода с помощью синтеза алгоритмов искусственного интеллекта и данных дистанционного зондирования Земли. В целях эффективного строительства газопроводов необходим тщательный комплексный анализ множества геологических, экологических, экономических и инфраструктурных факторов. Проектирование маршрута основано на принципе построения траектории наименьшей стоимости. Для этого проведен многофакторный анализ территории по ключевым параметрам, влияющим на финансовые затраты при строительстве. Выделены следующие группы признаков: водные преграды, геоморфологические факторы, существующие транспортные магистрали, особо охраняемые природные зоны и близость к крупным населенным пунктам. Изучен и адаптирован подход многофакторного анализа пригодности, на основе которого формировалась карта стоимости, используемая при поиске пути наименьшей стоимости. Основным результатом работы является полученное программное решение, обеспечивающее оптимизацию весовых коэффициентов при многофакторном анализе территорий для прокладки магистральных газопроводов на основе генетического алгоритма. К преимуществам предложенного подхода относятся автоматизация процесса и учет региональных особенностей территорий. В качестве практического применения разработаны траектории, обеспечивающие решение задачи газификации Красноярского края Российской Федерации.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, эволюционный алгоритм, поиск пути наименьшей стоимости, оптимизация, трассы трубопровода, алгоритм A*

Вклад авторов

Лобанов В.К. — общая концепция исследования, научное руководство; Кондрашина М.С. — написание текста, визуализация; Гаджиев Ш.М. — написание текста. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования

Лобанов В.К., Кондрашина М.С., Гаджиев Ш.М. Применение генетического алгоритма для задач проектирования магистральных газопроводов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 4. С. 472–480. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-472-480>

© Лобанов В.К., Кондрашина М.С., Гаджиев Ш.М., 2025



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

Application of a Genetic Algorithm for Pipeline Route Design

Vasily K. Lobanov^{id}, Mariia S. Kondrashina^{id}✉, Shamil M. Gadzhiev^{id}

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ 1132236536@rudn.ru

Article history

Received: July 2, 2025

Revised: September 22, 2025

Accepted: September 30, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. This study investigates the evaluation of a new approach for the pipeline route design process using the synthesis of artificial intelligence algorithms and Earth remote sensing data. For the effective construction of gas pipelines, a thorough comprehensive analysis of various geological, environmental, economic, and infrastructural factors is necessary. Route design is based on the principle of building a trajectory with the lowest cost. For this purpose, a multifactorial analysis of the territory was conducted according to key parameters that affect the financial costs during construction. The following groups of features were identified: water barriers, geomorphological factors, existing transport routes, specially protected natural areas, and proximity to large settlements. The approach of multifactorial suitability analysis was studied and adapted, on the basis of which the cost map used in the search for the path of lowest cost was formed. The main result of this study is the obtained software solution, which provides optimization of weighting coefficients in the multifactorial analysis of territories for laying main gas pipelines based on a genetic algorithm. The advantages of the proposed approach are the automation of the process and consideration of the regional characteristics of the territories. As a practical application, trajectories have been developed to solve the problem of gasification in the Krasnoyarsk Territory of the Russian Federation.

Keywords: earth remote sensing, evolutionary algorithm, least-cost path search, optimization, pipeline routing, algorithm A*

Authors' contribution

Lobanov V.K. — research concept, supervision; Kondrashina M.S. — writing, visualization; Gadzhiev Sh.M. — writing. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Lobanov VK, Kondrashina MS, Gadzhiev ShM. Application of a genetic algorithm for pipeline route design. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(4):472–480. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-472-480>

Введение

Проектирование трубопроводов является сложной инженерной задачей, требующей специалистов из разных сфер науки и сотен часов для оценки разных факторов: геологических, экологических, экономических и инфраструктурных [1].

При строительстве протяженных магистралей даже незначительные изменения траектории трубопровода приводят к существенной экономии ресурсов.

Цель исследования — разработка метода проектирования маршрута трубопровода. Для достижения цели были решены следующие задачи: изучена возможность применения мно-

гофакторного анализа пригодности территории; применен генетический алгоритм для оптимизации весовых коэффициентов факторов; предложены варианты траекторий газопровода.

Новизна подхода заключается в применении генетического алгоритма для подбора весовых коэффициентов факторов на основе существующих трубопроводов, что позволяет решать задачу даже при отсутствии экспертной оценки влияния факторов на стоимость работ по проектированию маршрута.

В качестве координат начала и конца проектируемого газового трубопровода рассмотрены Ковыктинское газоконденсатное месторождение, город Новосибирск и участок в окрестностях Красноярска. Выбор связан с тем,

что уровень газификации Красноярского края в среднем составляет около 19 %, что значительно ниже среднего показателя по стране — 73 %¹.

В нефтегазовой отрасли планирование маршрута основано на минимизации затрат на строительство и эксплуатацию трубопроводов: проектирование траектории трубопровода требует построения пути с наименьшей стоимостью прокладки [2; 3].

1. Методы

1.1. Многофакторный анализ пригодности территории

Стоимость прокладки в интересующей области определяется методом анализа пригодности территории. Создается карта пригодности, где каждый пиксель карты имеет значение, обозначающее, насколько конкретный участок подходит для использования [4].

В нашем случае итоговая карта пригодности представляет собой карту стоимости про-

хождения маршрута [5; 6], в которой чем ближе значение пикселя к нулю, тем выгоднее область. Первым этапом проведения анализа пригодности является определение факторов, влияющих на стоимость [7].

Были выделены следующие группы признаков, усложняющих постройку трубопровода: водные преграды, особенности рельефа, транспортные магистрали и особо охраняемые зоны. Дополнительно был рассмотрен фактор близости к населенным пунктам для баланса между доступностью и безопасностью трубопровода.

Основой для формирования факторов пригодности послужили данные из двух источников: OpenStreetMap (OSM)², данные из которого получались при помощи плагина QuickOSM в QGIS, и облачного сервиса Google Earth Engine (GEE). Информация по выгружаемым из OSM факторам представлена в табл. 1. Векторные данные преобразовывались в растровые изображения, где значение 1 обозначало наличие фактора, а 0 — его отсутствие.

Таблица 1 / Table 1

Данные, обрабатываемые в QGIS / Data processed in QGIS

Фактор / Factor	Тег выгрузки / Export tag	Тип данных / Data type
Болота 1-й тип / Wetlands 1st type	Wetland = Bog	Полигон / Polygon
Болота 2-й тип / Wetlands 2nd type	Wetland = Fen	Полигон / Polygon
Болота 3-й тип / Wetlands 3rd type	Natural = Wetland (- Fen, Bog)	Полигон / Polygon
Реки / Rivers	Waterway = River	Линия / Line
Автомобильные дороги / Highways	Highway = Motorway Trunk Primary Secondary	Линия / Line
Железные дороги / Railways	Landuse = Railway	Линия / Line

Источник: выполнено М.С. Кондрашиной / Source: by M.S. Kondrashina

В GEE обрабатывались наборы данных: цифровая модель рельефа SRTM⁴ для расчета уклонов, снимки ночной освещенности VIIRS⁵ за период 01.01.2024 — 31.01.2025 для опреде-

ления удаленности от жилых зон и полигоны особо охраняемых природных территорий (ООПТ) из базы WDPA⁶. Уклоны учитывались по следующему правилу: значение менее 20° —

¹ Пашкова Л., Смирнов Г. «Газпром» начал проектирование газопровода длиной 700 км в Красноярск // РБК. URL: <https://www.rbc.ru/business/31/08/2023/64f0a5259a79473ff6f6c945> (дата обращения: 21.04.2025).

² OpenStreetMap. URL: <https://www.openstreetmap.org/#map=14/-1.32006/36.89358> (accessed: 21.04.2025).

⁴ NASA SRTM Digital Elevation 30m. URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/USGS_SRTM_GL1_003 (accessed: 21.04.2025).

⁵ VIIRS Stray Light Corrected Nighttime Day/Night Band Composites Version 1. URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NOAA_VIIRS_DNB_MONTHLY_V1_VCMSLCFG (accessed: 21.04.2025).

⁶ WDPA: World Database on Protected Areas (polygons). URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/WCMC_WDPA_current_polygons (accessed: 21.04.2025).

0,5, от 20° до 40° — 0,8, а свыше 40° — 0,9. Удаленность от населенных пунктов рассчитывалась через евклидово расстояние и инвертировалась для соответствия логике анализа, где 1 — это зоны вблизи городов, а 0 — удаленные территории. Также добавлялись буферные зоны вокруг некоторых факторов. Например, для автодорог устанавливался буфер 25 м, для железных дорог — 50 м, а для болот и рек — 30 м. Это позволило учесть не только непосредственное наличие объектов, но и влияние зоны вокруг.

На основе обработанных данных была сформирована карта стоимости с применением методов растровой алгебры. Рассчитывается взвешенная сумма факторов (без ООПТ), затем для исключения особо охраняемых природных территорий выполняется умножение результата на бинарную маску ООПТ, обнуляющее значение стоимости в этих зонах. На заключительном этапе нулевые значения заменяются на бесконечно высокую стоимость (∞), что исключает их из рассмотрения алгоритмом поиска пути наименьшей стоимости A^* [8]. Каждый пиксель финальной карты отражает увеличение стоимости построения пути.

1.2. Генетический алгоритм для оптимизации весовых коэффициентов факторов

Традиционно для оценки факторов используют экспертный подход. При анализе литературы были найдены сведения о повышающих коэффициентах для расчета стоимости строительства 1 км трубопровода, прокладываемого в сложных условиях или на пересечениях с естественными и искусственными препятствиями⁷.

Данные весовые коэффициенты были нормализованы и выбраны в качестве опорных. В ходе исследования изучался вопрос: насколько полученные коэффициенты факторов актуальны и применимы к нашей терри-

тории? Каким образом не представленные в исследованиях факторы следует оценивать? Возможен ли анализ при отсутствии экспертных оценок? Мы применили эволюционный алгоритм, в котором в качестве эталона использовался существующий трубопровод, и на его основе получали весовые коэффициенты для каждого интересующего фактора.

Генетический алгоритм (ГА) — это адаптивный эвристический метод поиска, основанный на принципах естественного отбора из биологии. Впервые был предложен в 1975 г. Джоном Холландом в книге «Adaptation in Natural and Artificial Systems» [9].

Применение ГА для подбора весовых коэффициентов, влияющих на стоимость прокладки газопровода, приведено на схеме 1 (рис. 1).

В алгоритме особи популяции представляются в виде набора весов каждого фактора. Ключевым отличием предложенного решения от общепринятого является блок селекции, поскольку оценка весовых коэффициентов производится на основе построенного маршрута. Следовательно, для каждой особи необходимо получить карту стоимости и спроектировать маршрут на основе алгоритма A^* , после чего рассчитать степень схожести между опорным и построенным маршрутами.

В каждом поколении лучшие комбинации весов «выживают» и дают потомство, то есть ГА позволяет получить значение веса, оптимального для исследуемых территориальных условий.

В работе составляющие блоки алгоритма, описываются следующим образом [10]:

1) *селекция* — выбор родителей для скрещивания. Применялся турнирный подход, из 5 особей выбиралась одна с максимальным значением оценки;

2) *оценка приспособленности (fitness)* — совпадение маршрутов (построенного и целевого) и их буферных зон с использованием коэффициента Жаккара, вычисляемого как отно-

⁷ СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85. Дата введения 2013-07-01.

шение размера их пересечения к размеру их объединения;

3) *скрещивание* — комбинация генов родителей для создания потомков. В предложен-

ном решении использовался арифметический метод, где $\text{Child} = a \times \text{Parent1} + (1 - a) \times \text{Parent2}$;

4) *мутация* — случайное изменение генов (веса одного фактора).

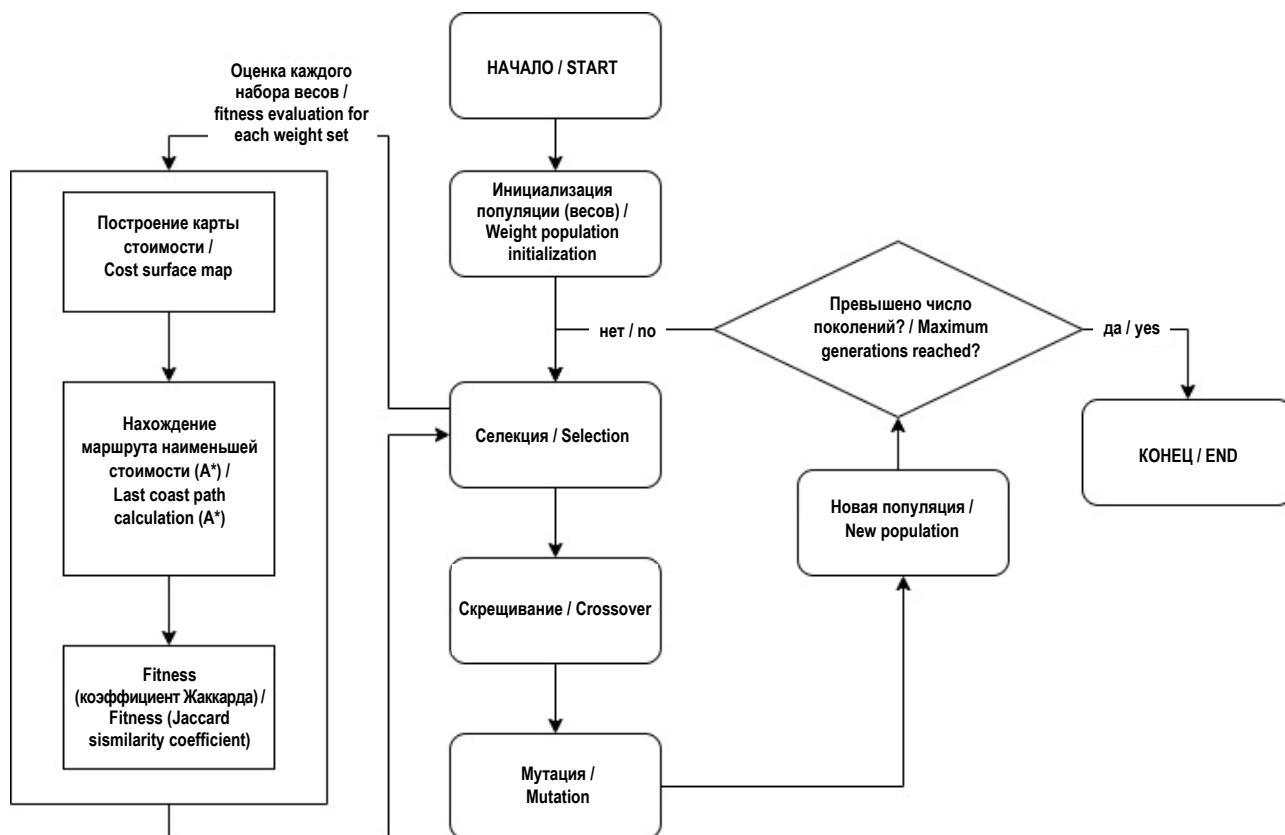


Рис. 1. Алгоритм работы ГА для оптимизации весов факторов

Источник: выполнено М.С. Кондрашиной

Figure 1. Genetic Algorithm for Optimizing Factor Weights

Source: by M.S. Kondrashina

2. Результаты и обсуждение

В качестве опорного трубопровода был выбран участок маршрута Омск — Иркутск, который пролегает через большую часть области интереса и представлен на рис. 2. Для обучения были выгружены все факторы с масштабом растрового изображения 500 м/пкс. Основные параметры используемые во время поиска весов при помощи ГА, представлены в табл. 2.

По итогам обучения были получены новые весовые коэффициенты представленные в

табл. 3 и спроектированы маршруты газопроводов на рис. 3, *а* и *б*. Сравнительный анализ маршрутов показывает, что использование генетического алгоритма для настройки весовых коэффициентов позволяет минимизировать расхождения между построенной и обучающей траекторией. Данный результат подтверждает эффективность предложенного подхода для нахождения весов различных признаков с учетом территориальной особенности.

Кроме того, в рамках проведенного исследования были разработаны траектории газопро-

водов для достижения поставленной цели — газификации Красноярска. Первый маршрут проложен от Новосибирска до участка вблизи Красноярска, а второй — от месторождения

Жигалово до этого же места. Оба трубопровода представлены на рис. 4 и 5 в двух вариантах — построение на основе начальных и подобранных коэффициентов.

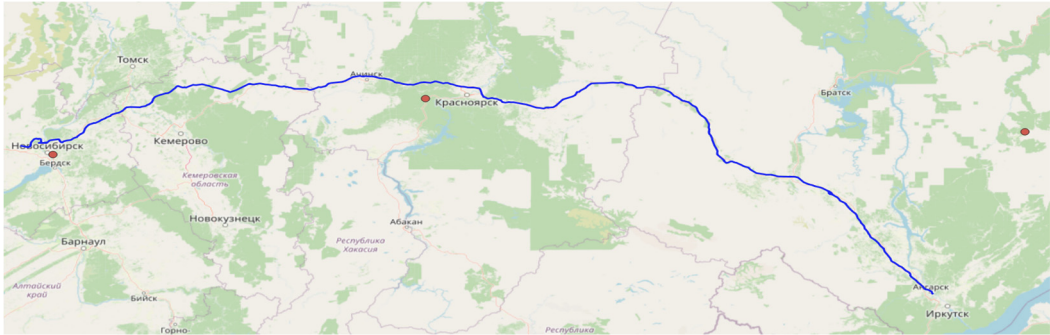


Рис. 2. Участок нефтепровода Омск — Иркутск (точками отмечены рекомендованные места начала и конца газопровода, проектируемого в работе)
Источник: выполнено М.С. Кондрашиной

Figure 2. Section of the Omsk — Irkutsk Oil Pipeline (points indicate the recommended start and end locations of the gas pipeline designed in this work)
Source: made by M.S. Kondrashina

Таблица 2 / Table 2

Параметры обучения ГА / Genetic Algorithm (GA) Training Parameters

Параметр / Parameter	Значение / Value
Число поколений / Number of Generations	10
Размер популяции / Population Size	30
Значение мутации / Mutation Value	0,5
Дополнительный параметр перекрытие путей / Additional Parameter Route Overlap	500

Источники: выполнено М.С. Кондрашиной / Source: by M.S. Kondrashina

Таблица 3 / Table 3

Весовые коэффициенты факторов / Factor Weight Coefficients

Фактор / Factor	Начальный вес / Initial Weight	Подобранный вес / Optimized Weight
Болота 1-й тип / Wetlands 1st type	0,5	0,5
Болота 2-й тип / Wetlands 2nd type	0,9	0,4
Болота 3-й тип / Wetlands 3rd type	0,7	0,9
Уклон / Slope	1	0,9
Реки / Rivers	0.7	0,4
Автомобильные дороги / Highways	0,6	1
Железные дороги / Railways	0,6	0,3
Удаленность от жилых зон / Distance from Residential Areas	1	0,5

Источники: выполнено М.С. Кондрашиной / Source: by M.S. Kondrashina

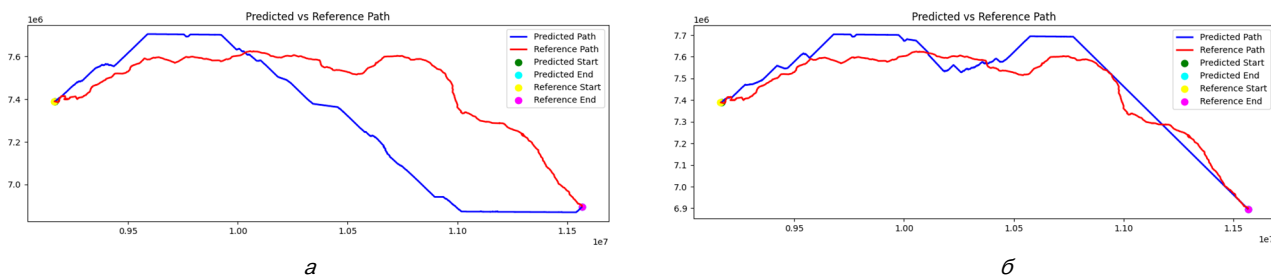


Рис. 3. Построенные маршруты на основе: *a* — начальных весов; *б* — оптимизированных
Источник: выполнено М.С. Кондрашиной

Figure 3. Constructed routes based on: *a* — initial weights; *б* — optimized
Source: by M.S. Kondrashina

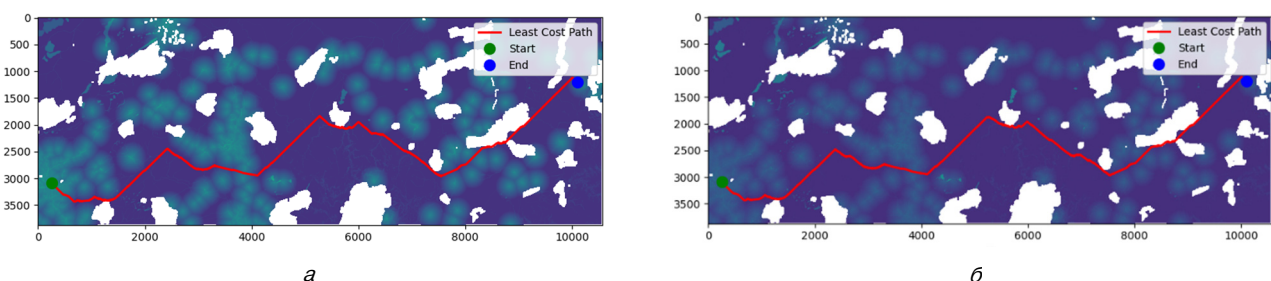


Рис. 4. Маршрут Новосибирск — Красноярск: *a* — начальные веса; *б* — оптимизированные веса
Источник: выполнено М.С. Кондрашиной

Figure 4. Novosibirsk — Krasnoyarsk route: *a* — initial weights; *б* — optimized weights
Source: by M.S. Kondrashina

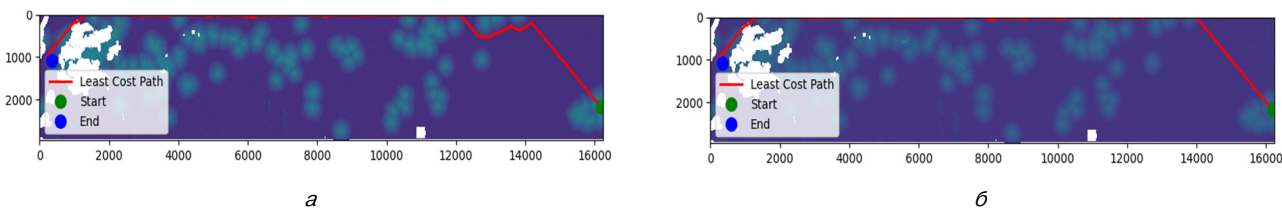


Рис. 5. Маршрут Жигалово — Красноярск: *a* — начальные веса; *б* — оптимизированные веса
Источник: выполнено М.С. Кондрашиной

Figure 5. Zhigalovo–Krasnoyarsk route: *a* — initial weights; *б* — optimized weights
Source: by M.S. Kondrashina

Закключение

Исследование было посвящено гибридне- му подходу, соединяющему в себе много- факторный анализ территории и оптимизацию весовых коэффициентов для построения маршру- тов с использованием геопространственных данных. Реализация такого подхода позволяет на основе генетического алгоритма и отобран- ных признаков создать комплексную систему

проектирования и принятия решения, сочета- ющую преимущества искусственного интел- лекта и геопространственного анализа.

В ходе работы проанализированы получен- ные из открытых источников факторы, влияю- щие на стоимость построения газопроводов. Раз- работанный метод оптимизации весовых коэф- фициентов с использованием генетического алгоритма доказал свою эффективность для ре- шения задачи проектирования магистральных

трубопроводов. Преимуществами предложенного подхода являются автоматизация процесса и учет региональных особенностей территорий. В качестве практического применения нами разработаны траектории для решения задачи газификации Красноярского края.

Ограничения вычислительных мощностей при проведении экспериментов позволяли использовать факторы в масштабе 500 м/пкс. Даже при этом получены улучшения для оптимизации весов. При наличии больших вычислительных мощностей рекомендуется использовать максимально доступный для спутниковых снимков Sentinel масштаб — 10 м/пкс, а также увеличить число поколений и размер популяции с целью охватить большую вариативность значений весов. Это, безусловно, позволит получить более качественные коэффициенты при применении генетического алгоритма.

References / Список литературы

1. Novoselova IY. Socio-ecological-economic selection of the oil pipeline route. *Regional Environmental Issues*. 2024;(5):85–90. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2024-5-85-89> EDN: VZGQNH

Новоселова И.Ю. Социо-эколого-экономический выбор маршрута нефтепровода // Проблемы региональной экологии. 2024. № 5. С. 85–90. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2024-5-85-89> EDN: VZGQNH

2. Voronin KS, Grigorieva PV, Cherenstov DA. Methods for estimating the pipeline construction cost when choosing its route. *Oil and Gas Studies*. 2018;(3):87–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2018-3-87-91> EDN: XTHSLR

Воронин К.С., Григорьева П.В., Черенцов Д.А. Методы оценки стоимости сооружения участка трубо-

провода при выборе трассы // Известия вузов. Нефть и газ. 2018. № 3. С. 87–91. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2018-3-87-91> EDN: XTHSLR

3. Arya AK, Jain R, Yadav S, Bisht S, Gautam S. Recent trends in gas pipeline optimization. *Materials Today: Proceedings*. 2022;57(4):1455–1461. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.232>

4. Bozdağ A, Yavuz F, Günay AS. AHP and GIS based land suitability analysis for Cihanbeyli (Turkey) county. *Environmental Earth Sciences*. 2016;75(9):1–15. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5558-9> EDN: OCVRFR

5. Gyabeng BA. Selection of optimum petroleum pipeline routes using a multi-criteria decision analysis and GIS least-cost path approach. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*. 2022;10(6):572–579. <http://doi.org/10.29322/IJSRP.10.06.2020.p10270>

6. Durmaz AI, Ünal EÖ, Aydın CC. Automatic pipeline route design with multi-criteria evaluation based on least-cost path analysis and line-based cartographic simplification: A case study of the Mus project in Turkey. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2019;8(4):173. <https://doi.org/10.3390/ijgi8040173>

7. Nirala PK, Kumar M, Singh P, Singh P, Das B. Route alignment selection and planning for Ganga Express Way from Meerut to Prayagraj region based on multi-criteria decision analysis techniques with geographic information systems and remote sensing techniques. *Chinese Journal of Urban and Environmental Studies*. 2025;13(2):2550012. <https://doi.org/10.1142/S2345748125500125>

8. Hart PE, Nilsson NJ, Raphael BA. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*. 1968;4(2):100–107. <http://doi.org/10.1109/TSSC.1968.300136>

9. Holland JH. *Adaptation in natural and artificial systems*. MIT Press Publ.; 1992. ISBN 0262581116, 9780262581110

10. Naaman DW, Ahmed BT, Ibrahim IM. Optimization by Nature: A Review of Genetic Algorithm Techniques. *The Indonesian Journal of Computer Science (IJCS)*. 2025;14(1):268–284. <https://doi.org/10.33022/ijcs.v14i1.4596>

Сведения об авторах

Лобанов Василий Константинович, старший преподаватель кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 7266-5340, ORCID: 0000-0001-8163-9663; e-mail: lobanov-vk@rudn.ru

Кондрашина Мария Сергеевна, магистр кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0008-8526-9143; e-mail: 1132236536@rudn.ru

Гаджиев Шамиль Магомедэминович, магистр кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0006-1570-4133; e-mail: 1132236511@rudn.ru

About the authors

Vasily K. Lobanov, Senior Lecturer of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 7266-5340, ORCID: 0000-0001-8163-9663; e-mail: lobanov-vk@rudn.ru

Mariia S. Kondrashina, Graduate student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0008-8526-9143; e-mail: 1132236536@rudn.ru

Shamil M. Gadzhiev, Graduate student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0006-1570-4133; e-mail: 1132236511@rudn.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-4-481-490

EDN: DPNKNY

Research article / Научная статья

The Role of Intelligent Data Processing in Optimizing Companies' Financial Efficiency

Elizaveta I. Chaplygina^{ID}, Larisa V. Kruglova^{ID}✉, Sofya G. Glavina^{ID}

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ kruglova-lv@rudn.ru

Article history

Received: May 6, 2025

Received: July 23, 2025

Accepted: July 30, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. The relevance of the research lies in the increasing need for the use of intelligent data processing (IDP) to increase the financial efficiency of a business in conditions of economic instability. The development of artificial intelligence and machine learning allows organizations to effectively manage risks, optimize internal processes, and improve the accuracy of financial forecasting. The purpose of the research is to assess the impact of intelligent data processing on the financial efficiency of a business, identify key problems and propose solutions. To achieve this goal, a review of the literature was conducted, methods for optimizing business processes were identified, barriers to the introduction of IDP and prospects for its application were identified. The research methods include comparative, systematic and statistical analysis. The use of these methods allowed us to deeply explore the problem of implementing IDP in real business cases. The results of the study confirm that intelligent data processing significantly increases the financial efficiency of companies. However, the implementation of IDP is fraught with a number of problems, such as the need for additional investments, restructuring of business processes and ensuring staff qualifications. Despite the difficulties, the introduction of IDP allows companies to significantly increase their competitiveness and profitability. The conclusion of the research emphasizes that intelligent data processing in the modern economy is an important tool for improving the financial stability and competitiveness of businesses. With well-organized implementation, IDP helps optimize processes, improve forecasting and risk management, which leads to improved financial results.

Keywords: business process optimization, financial forecasting, risk management, artificial intelligence, machine learning, comparative, system and statistical analysis, financial sustainability

Authors' contribution

Chaplygina E.I. — conducting research, writing, visualization; Kruglova L.V. — planning and overall supervision; Glavina S.G. — validation. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Chaplygina EI, Kruglova LV, Glavina SG. The role of intelligent data processing in optimizing companies' financial efficiency. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(4):481–490. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-481-490>



Роль интеллектуальной обработки данных в оптимизации финансовой эффективности компаний

Е.И. Чаплыгина^{ORCID}, Л.В. Круглова^{ORCID}✉, С.Г. Главина^{ORCID}

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ kruglova-lv@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 6 мая 2025 г.

Доработана: 23 июля 2025 г.

Принята к публикации: 30 июля 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Актуальность исследования заключается в возрастающей необходимости применения интеллектуальной обработки данных (ИОД) для повышения финансовой эффективности бизнеса в условиях экономической нестабильности. Развитие искусственного интеллекта и машинного обучения позволяет организациям эффективно управлять рисками, оптимизировать внутренние процессы и повышать точность финансового прогнозирования. Цель исследования — оценка влияния интеллектуальной обработки данных на финансовую эффективность бизнеса, выявление ключевых проблем и путей их решения. Для достижения цели проведен обзор литературы, определены методы оптимизации бизнес-процессов, выявлены барьеры внедрения ИОД и перспективы его применения. Методы исследования включают сравнительный, системный и статистический анализ. Применение данных методов позволило глубоко исследовать проблему внедрения ИОД в реальные бизнес-кейсы. Результаты исследования подтверждают, что интеллектуальная обработка данных значительно повышает финансовую эффективность компаний. Однако внедрение ИОД сопряжено с рядом проблем, таких как необходимость дополнительных инвестиций, перестройка бизнес-процессов и обеспечение квалификации персонала. Несмотря на сложности, внедрение ИОД позволяет компаниям существенно повысить конкурентоспособность и прибыльность. Результаты исследования показали, что интеллектуальная обработка данных в условиях современной экономики является важным инструментом для повышения финансовой устойчивости и конкурентоспособности бизнеса. При грамотно организованном внедрении ИОД способствует оптимизации процессов, улучшению прогнозирования и управлению рисками, что приводит к улучшению финансовых результатов.

Ключевые слова: оптимизация бизнес-процессов, финансовое прогнозирование, управление рисками, искусственный интеллект, машинное обучение, сравнительный, системный и статистический анализ, финансовая устойчивость

Вклад авторов

Чаплыгина Е.И. — проведение исследования, написание текста, визуализация; Круглова Л.В. — общее руководство, планирование; Главина С.Г. — валидация. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования

Chaplygina E.I., Kruglova L.V., Glavina S.G. The role of intelligent data processing in optimizing companies' financial efficiency // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 4. С. 481–490. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-481-490>

Introduction

In current dynamic business environment, companies are forced to be able to quickly adapt to constantly changing conditions [1]. The economic situation encourages businesses to be flexible and

make prompt management decisions. The financial efficiency of companies is often determined by the quality and speed of information processing, the accuracy of internal forecasts, and competent risk management [2]. Intelligent data processing (IDP) is gradually becoming one of the key tools

for business optimization and increasing competitiveness in the market [3].

Intelligent data processing is a set of data analysis methods based on artificial intelligence and machine learning, which allows companies to automate their own processes [4]. IDP contains a wide range of technologies and tools that enable companies not only to automate routine tasks, but also to significantly improve the accuracy of analytical reporting [5]. Analysis of large volumes of data allows businesses to minimize errors and improve the efficiency of management decision-making [6]. Modern approaches to intelligent data processing involve analyzing big data in real time [7]. By using IDP, enterprises are able to respond quickly enough to market changes and adjust their own strategies if necessary.¹

One of the most important areas of application of IOD is the financial component [8]. The main goal of any business is to make a profit. With the help of implementing intelligent data analysis, companies strive to optimize financial processes and increase efficiency. As part of increasing the financial efficiency of enterprises, IOD algorithms are used as follows:

1. Implementation of predictive analysis, which calculates a forecast based on historical data and market trends.
2. Intelligent cost control, which allows you to analyze cost efficiency and identify excess costs.
3. Investment risk management, which determines the most profitable investment direction for the business.
4. Dynamic pricing and competitive environment analysis, which makes it possible to automate pricing based on market trends, etc.

The implementation of analytical tools helps businesses increase the level of automation, which is quite important and promising in the current unstable economic environment.

The relevance of studying the role of intelligent data processing in business economic processes is due, first of all, to significant technological

progress, expressed in the development of artificial intelligence and machine learning, which is becoming an integral part of the strategic management of companies [9].

The purpose of the study is to assess the impact of intelligent analysis on the financial performance of a business: identifying key problems and proposing ways to solve them. To achieve this goal, the following research objectives were defined:

1. Review of literature on the use of IOD in financial management.
2. Definition of the main methods for optimizing business processes.
3. Identification of key barriers to the implementation of intelligent algorithms in financial management.
4. Study of promising areas for the development of IOD in the context of improving the financial efficiency of business.

The object of the study is the financial processes of companies associated with the use of intelligent data processing. The subject of the study is the methods and technologies of IOD used to analyze financial flows.

Organizations that actively use smart data analysis have more competitive advantages in the market and achieve higher financial results [10]. There is also a downside to using IOD, which is expressed in the need for additional investment, forced restructuring of internal business processes, and ensuring cybersecurity.

This article is aimed at reviewing studies on the topic of intelligent data processing in the context of improving business financial processes. The article analyzes the advantages and disadvantages of using smart data analysis, discusses prospects, identifies problems, and suggests ways to solve them.

1. Methods

The following methods were used in the study: comparative analysis, system analysis and statistical analysis of intelligent data processing in

¹ Vysotsky V.I. *Artificial intelligence in financial analytics: a revolution in decision-making*. (In Russ.) Available from: <https://visotsky.com/public/site/knownedges/iskusstvennyy-intellekt-v-finansovoy-analitike-revolutsiya-v-prinyatii-resheniy> (accessed: 14.03. 2025).

the financial sector [11]. Each of the mentioned research approaches makes it possible to study the problem of using IOD in the financial component of business in sufficient depth, identifying not only general trends, but also key aspects that require special attention and improvement.

In this work, comparative analysis was used to evaluate various technologies in the field of IOD on the domestic market, which made it possible to identify the most effective methods of intelligent information analysis, as well as to determine opportunities for improving existing technologies [12].

In the context of the study, system analysis was aimed at studying how various methods of intelligent information processing can be integrated into specific processes of companies, what kind of business infrastructure is necessary for their successful application, and what changes may be required for their implementation [13]. A systematic approach to the implementation of analytics, according to the authors of the study [14], requires taking into account the entire ecosystem of the organization, including technologies, processes and personnel, which increases the effectiveness of decision-making and adaptation.

In this paper, statistical analysis was applied to evaluate the effectiveness of financial forecasting methods using two types of analysis:

1. Regression analysis aimed at studying dependencies between processes.
2. Correlation analysis tracing the relationships between processes.

This approach allowed us to determine how big data analysis can optimize and improve the efficiency of financial forecasting and improve the management of financial processes².

The study focused on methods for forecasting financial flows, optimizing business processes, and managing risks using big data analytics. The problems of implementing intelligent data processing in business processes of real companies contain both technological and financial aspects, as well as organizational problems, which, for

example, may be associated with the operational adaptation of existing processes. The mentioned methods allowed us to comprehensively study the situation, identify the main barriers and prospects for using IOD. Despite the difficulties in implementing intelligent analysis in real business cases, the use of intelligent algorithms can significantly improve the efficiency of financial management.

2. Results and Discussion

The analysis of literature in our country within the framework of the study confirmed the extremely important role of intellectual data processing in financial business processes. The main areas of use of IOD by organizations are: financial forecasting, optimization of business processes, and risk management. The most common areas were identified, distinguished by their effectiveness in improving financial results and increasing the financial efficiency of companies, and it was determined that this process is associated with a number of problems that require solutions.

2.1. Forecasting Financial Flows

In the scientific work “Application of neural networks in monitoring and forecasting financial flows” the author I.V. Matyush analyzes the application of artificial intelligence (AI) methods in the context of increasing the accuracy of forecasting business economic indicators. The author refers to the matrix of payment balance coefficients and notes that financial flows determine the stability of companies in the market, and monitoring and forecasting directly affect the financial efficiency of a business. While traditional statistical forecasting methods have limited accuracy, neural networks are capable of processing big data in real time, automating analysis and building complex relationships. AI transforms approaches to assessing, monitoring and forecasting business economic indicators, which contributes to making more informed management decisions and optimizing companies’ financial resources [15]. As shown in

² UP lab. *Big Data Analysis*. (In Russ.) Available from: <https://www.uplab.ru/blog/analiz-bolshih-dannyh-big-data/> (accessed: 14.03. 2025).

the study [16], the application of machine learning methods in financial modeling significantly increases the accuracy of forecasts and reduces the level of uncertainty in managing financial flows. At the same time, the implementation of artificial intelligence methods in real business processes within the framework of forecasting financial flows has some certain problems (Figure 1):

Lack of competent specialists	•Implementation of certification corporate training
AI's dependence on the quality of input data	•Pre-cleaning and unification of data
Strict standardization of AI methods	•Development of an internal corporate legal framework

Figure 1. Issues in Financial Flow Forecasting with IDP and Their Solutions
Source: by E.I. Chaplygina

To obtain and process reliable results, as well as to support intelligent analysis systems, competent specialists with the relevant competencies are required. The labor market may not have enough experts in these areas. It is recommended to implement corporate employee training programs. Investing in the development of company's own certification programs will not only improve the qualifications of personnel, but also strengthen employee loyalty to the employer.

The dependence of artificial intelligence on the quality and completeness of the source data directly affects the result obtained. In the event of errors and inconsistencies in the financial and economic information of the business, smart analysis may not be built entirely correctly. Companies often experience problems with distortion of analytical conclusions due to the integration of information from different internal sources. The use of preliminary data cleaning systems will allow tracking and eliminating inconsistencies even before they enter the AI model. Standardization of data at all levels of the company can also prevent potential errors.

Requirements for compliance with regulatory and legal acts create risks of violation of legislation and reduce the likelihood of using intelligent analysis methods. Artificial intelligence must comply with strict rules and standards of Russian legislation governing financial and economic processes. The creation of an adaptable legal framework will ensure compliance with regulations, taking into account the company's use of datamining methods and minimize the risks of violations.

2.2. Optimization of Business Processes

In the work of R.S. Nazipov "Prospects for the application of artificial intelligence in the optimization of business processes of companies" the prospects for the application of intelligent data analysis in the framework of business optimizations are studied. The automation of routine tasks through the elimination of errors obtained in the presence of the human factor, improvement of the quality of customer service, as well as the increase in the competitiveness of companies are noted as positive aspects of implementation. The author emphasizes that the implementation of AI requires careful planning and risk assessment [17].

The use of intelligent data processing methods in the framework of business process optimization also has some barriers that require clarification (Figure 2).

Difficulties with interpreting models	Using the most transparent algorithms to improve interpretability
The need to restructure business processes	Step-by-step implementation of IDP with parallel adaptation of internal processes
Staff's fear of job losses	Explaining the benefits of IDP and new career opportunities

Figure 2. Issues in business process optimization with IDP and their solutions
Source: by E.I. Chaplygina

Difficulties with interpreting artificial intelligence models can accompany businesses, since neural networks do not have simplicity and trans-

parency. Decision-making in organizations based on complex AI mechanisms can be difficult. However, the most transparent intelligent algorithms are perceived easier and more understandable. For example, the modern intelligent software “Sber Business Soft” is focused on simplification and accessibility. The system provides ready-made solutions within the framework of data analysis, which are configured automatically and produce results. Through a simple interface, clients have access to a set of tools, for example, for financial analytics, cost planning, optimization of business processes, etc.³. Such IOD algorithms are also able to better convey the essence through visualization, which in turn can significantly increase the level of customer trust.

An important problem on the way to process automation using IOD technologies may be the forced restructuring of business processes. The implementation of intelligent analysis, one way or another, involves a revision of the internal processes of the organization that affect the formation of the financial results of the business. Changes are often a hard hit. However, it is possible to switch to IOD gradually and consistently, which can reduce staff stress, as well as enable the business to apply smart analysis methods most effectively.

Automation of processes in companies often gives rise to employee concerns about preserving their own jobs. Negative perception can slow down the implementation of new technologies. To eliminate barriers of misunderstanding between personnel and management, employees should be informed about the benefits of implementing intelligent data processing in the company and the opportunities that can positively affect their work. Demonstration of new career options for employees that will open up as a result of the digitalization of business processes will improve interaction.

2.3. Financial Risk Management

The authors A.A. Savvin et al. discuss the use of machine learning (ML) methods to improve the

accuracy of forecasts in the context of economic growth. They emphasize the correlation between accurate estimates in the current time and future risks. Risk forecasting taking into account the use of IOD allows us to identify complex relationships between data and external factors, which increases the accuracy of the analysis [18].

The implementation of intelligent information processing technologies in the context of financial risk management has many prospects, but also some features that must be taken into account (Figure 3):

Non-linearity of dependencies	• Application of nonlinear models for forecasting modeling
The influence of external factors	• Implementation of adaptive models
Limited data	• Data generation as part of improving the quality of the training set

Figure 3. Issues in Financial Risk Management with IDP and Their Solutions

Source: by E.I. Chaplygina

Traditional data processing methods, such as linear regression, suggest that a change in one indicator will lead to a proportional change in another. When considering situations from the real economy, it is worth considering that changes may not be linear and proportionate. Linear approaches may not take into account more complex relationships, which can distort the final results. Neural networks are able to take into account hidden relationships, which allows you to make the most accurate forecasts and competently manage risks. For example, the DataRobot automated machine learning platform is engaged in the construction and training of risk assessment models based on business data. DataRobot analyzes production processes, financial transactions, logistics processes, etc.⁴ The use of the recommended platform allows for automated forecasting of operational and financial risks.

³ *Sber Business Software*. (In Russ.) Available from: <https://sberbs.ru/> (accessed: 14.03.2025).

⁴ *DataRobot*. (In Russ.) Available from: <https://www.datarobot.com/> (accessed: 14.03.2025).

Traditional risk management methods may not take into account such external circumstances as: economic crisis, exchange rate fluctuations, changes in legislation, etc., which can lead to incorrect decisions. Accordingly, it is recommended to use adaptive models of smart machine learning analysis that are able to take into account not only internal corporate information, but also focus on current market and political circumstances.⁵ For example, the RoboKassa platform, a tool for online payments and transaction analysis, helps companies adapt their strategies to current market realities using its own assessment of changes in the external environment.⁶

Often, businesses face the lack of complete data, which can adversely affect the performance of the IOD model. The problem can be solved by generating data to improve the quality of the training set. For example, integration with data from external sources (government registries, open economic reports, etc.), as well as information simulation will expand the current data sets for training. Such a solution will improve the quality of training sets, which will positively affect the accuracy of financial forecasts and estimates. Intelligent IOD tools make it possible to optimize risk management strategies.

2.4. Discussion

The implementation of intelligent analysis methods in real business processes demonstrates an improvement in the accuracy of forecasts, on the basis of which management decisions are made that affect business strategy and the development of the company as a whole. However, the results of IOD largely depend on the quality of the source data and the qualifications of personnel. Organizations that actively use intelligent data

analysis methods have the opportunity to reduce risks and increase efficiency.

The global study by Enterprise Strategy Group and Oracle “Competitive Advantage in Finance and Operations Management” demonstrates that companies using AI and intelligent data analysis in financial and operational activities increase annual profits several times faster, and also significantly reduce the number of errors in the financial function and increase labor productivity.⁷

The scientific study was conducted among 700 executives from 13 countries. Enterprises that implemented innovative technologies in financial management received much more benefits than they initially expected. It is worth noting that 82% of companies that use smart analysis in business processes are ahead of competitors who do not use intelligent data processing methods. The survey confirmed an increase in the financial efficiency of companies and labor productivity due to the implementation of IOD methods (Figure 4).

Theoretically speaking, IOD proves its effectiveness in improving financial analysis and forecasting. This statement is supported by the results of scientific research and practical experience of corporations. However, problems with data quality and the need for qualified personnel remain relevant. The main reason for the positive results of implementing smart analysis methods is the ability of IOD to process large volumes of data and identify important hidden relationships.⁸

IOD technologies allow organizations not only to better forecast financial results, but also to minimize risks and adapt to changes in the market. However, without high-quality data and employee training, the benefits may be limited.

Future research in this area could focus on adapting IOD for small and medium-sized enterprises, as well as developing more robust models for dealing with uncertainty in initial data.

⁵ RB. Artificial intelligence in finance. (In Russ.) Available from: <https://rb.ru/opinion/iskusstvennyj-intellekt-v-finansah/> (accessed on 14 March 2025).

⁶ Robokassa. (In Russ.) Available from: <https://robokassa.com/> (accessed: 14.03. 2025).

⁷ Oracle. Artificial intelligence helps organizations accelerate growth and drive innovation. 2020. Available from: <https://www.oracle.com/cis/corporate/pressrelease/ai-helps-organizations-growth-2020-02-12.html> (accessed: 14.03. 2025).

⁸ FSE Editors and Writers. Methods of intelligent data analysis: extracting hidden patterns and trends. (In Russ.) Available from: <https://falconediting.com/ru/blog/metody-intellektualnogo-analiza-dannykh-izvlechenie-skrytykh-zakonomernostei-i-tendentsii/> (accessed: 14.03. 2025).

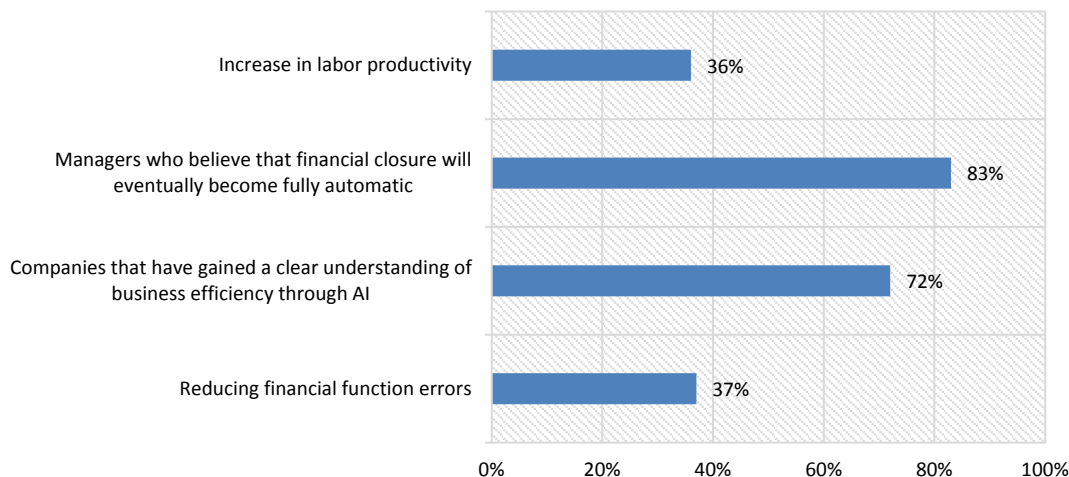


Figure 4. Key trends in financial process automation

Source: by E.I. Chaplygina

Conclusion

In an unstable and rapidly changing economic environment, the use of intelligent data processing is becoming a key element that has a significant impact on the optimization of financial processes of companies. The implementation of IOD methods demonstrates excellent results for business, giving companies that use innovative solutions strong competitive advantages.

Intelligent data analysis offers a wide range of tools that allow organizations to obtain the most accurate estimates and forecasts based on the analysis of not only internal corporate information, but also taking into account external circumstances, effectively manage financial, operational and investment risks, and automate business operations, reducing the number of errors due to the human factor. The implementation of IOD technologies helps enterprises adapt more quickly to market changes, increasing their competitiveness and financial stability.

However, despite the numerous advantages, the use of intelligent analysis is associated with a number of certain difficulties. Implementation of innovations requires additional investments, restructuring of internal business processes and development of personnel qualifications. In addition, it is necessary to take into account addi-

tional risks associated with the legal and ethical aspects of the use of artificial intelligence. The results of the study confirm that with a competent approach, planning and solving emerging problems, intelligent data processing can significantly increase financial efficiency and ensure the competitiveness of a business. The implementation of IOD methods is becoming an important step in achieving long-term success on the market.

References

1. Martynova YuA. Digital transformation and innovative management models in the industrial complex: challenges and opportunities for increasing competitiveness. *Innovation & investment*. 2023;(6):99–102. (In Russ.) EDN: WQXRCL
2. Zhukov BM. Administrative flexibility as the factor of maintenance of innovative activity of the enterprise. *Business In Law*. 2012;(1):304–306. (In Russ.) EDN: OVZXRJ
3. Sanarikova A. Optimization of business processes using artificial intelligence: prospects and challenges. *Endless light in science*. 2025;(2):137–142. (In Russ.) <http://doi.org/10.24412/2709-1201-2025-28-137-142> EDN: WYWNEY
4. Flegontov AV, Fomin VV. Software system for data processing. *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences*. 2013;(154):41–48. (In Russ.) EDN: PUHJLR
5. Renaldo N, Suhardjo, Suharti, Suyono, Cecilia. Optimizing Company Finances Using Business Intelligence

in Accounting. *Journal of Applied Business and Technology*. 2022;3(2):209–213. <https://doi.org/10.35145/jabt.v3i2.107>

6. Pingili R. AI-driven intelligent document processing for healthcare and insurance. *International Journal of Science and Research Archive*. 2025;14:1063–1077. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2025.14.1.0194>

7. Kirichenko AO, Zolkin AL, Urusova AB, Malova NN. Research on the impact of big data on decision-making in the corporate sector. *Journal of Applied Research*. 2024;(2):51–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.47576/2949-1878.2024.2.2.007> EDN: EOCPD

8. Andrushchuk VV. The role of artificial intelligence in optimizing financial transactions in the global market. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*. 2024;14(3-1):299–307. (In Russ.) EDN: WKOFUR

9. Murodov SA. Implementation of artificial intelligence in business processes: prospects for small and medium-sized enterprises in developing countries. *Raqamli Iqtisodiyot*. 2025;10:63–77. (In Russ.)

10. Pingili R. AI-driven intelligent document processing for banking and finance. *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*. 2025;7(2):98–109. <https://doi.org/10.51594/ijmer.v7i2.1802>

11. Kirilyuk IL. Methods of data mining and regulation of the digital transformation of the financial industry in Russia and in the world. *The Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*. 2020;(4):152–165. <http://doi.org/10.24411/2073-6487-2020-10048> EDN: YVWFOY

12. Voshev DV, Vosheva NA, Shepel RN, Son IM, Drapkina OM. Comparative analysis of the use of electronic internet of things technologies in the healthcare sector of foreign countries and Russia. *Manager zdravoohranenia*. 2023;(8):44–53. (In Russ.) <http://doi.org/10.21045/1811-0185-2023-8-44-53> EDN: KBFHTM

13. Zaslavskaya VL. Applied system analysis as a tool for achieving subject goals in business analytics. *Chrono-economics*. 2022;4(38):51–65. (In Russ.) EDN: SKDSYE

14. Akter S, Bandara R, Hani U, Wamba SF, Foropon C, Papadopoulos T. Analytics-based decision-making for service systems: A qualitative study and agenda for future research. *International Journal of Information Management*. 2019;48:85–95. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.01.020>

15. Matsiush IV. Application of neural networks in monitoring and forecasting financial flows. *Vestnik of Polotsk State University. Part D. Economics and Law Sciences*. 2024;2(67):16–20. (In Russ.) <http://doi.org/10.52928/2070-1632-2024-67-2-16-20> EDN: CWAZFR

16. Gu Sh, Kelly BT, Xiu D. Empirical Asset Pricing via Machine Learning. *31st Australasian Finance and Banking Conference*, 2018, 2019. Paper No. 18-04. <http://doi.org/10.2139/ssrn.3159577>

17. Nazipov RS. Prospects for applying artificial intelligence in optimizing companies' business processes. *International journal of humanities and natural sciences*. 2024;7-3(94):179–185. (In Russ.) <http://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-7-3-179-185> EDN: TXWTNE

18. Savvin AA, Nemtsev DS, Dragulenko VV. Application of machine learning in forecasting economic growth. *Journal of Applied Research*. 2023;(12):91–96. (In Russ.) http://doi.org/10.47576/2949-1878_2023_12_91 EDN: JHNUTF

Список литературы

1. Мартынова Ю.А. Инновационные стратегии и управление изменениями в промышленном комплексе: адаптация к динамичным рыночным условиям и технологическим изменениям // Инновации и инвестиции. 2023. № 6. С. 9–10. EDN: WQXRCL

2. Жуков Б.М. Управленческая гибкость как фактор поддержания инновационной активности предприятия // Проблемы экономики и юридической практики. 2012. № 1. С. 304–306. EDN: OVZXRJ

3. Санарикова А. Оптимизация бизнес-процессов с помощью искусственного интеллекта: перспективы и вызовы // Endless light in science. 2025. № 2. С. 137–142. <http://doi.org/10.24412/2709-1201-2025-28-137-142> EDN: WYWNEY

4. Флегонтов А.В., Фомин В.В. Система интеллектуальной обработки данных // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. 2013. № 154. С. 41–48. EDN: PUHJLR

5. Renaldo N., Suhardjo, Suharti, Suyono, Cecilia. Optimizing Company Finances Using Business Intelligence in Accounting // *Journal of Applied Business and Technology*. 2022. Vol. 3. No. 2. P. 209–213. <https://doi.org/10.35145/jabt.v3i2.107>

6. Pingili R. AI-driven intelligent document processing for healthcare and insurance // *International Journal of Science and Research Archive*. 2025. Vol. 14. P. 1063–1077. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2025.14.1.0194>

7. Кириченко А.О., Золкин А.Л., Урусова А.Б., Малова М.Н. Исследование влияния больших данных на принятие решений в корпоративном секторе // Журнал прикладных исследований. 2024. № 2. С. 51–55. <https://doi.org/10.47576/2949-1878.2024.2.2.007> EDN: EOCPD

8. Андрущук С.В. Роль искусственного интеллекта в оптимизации финансовых операций на мировом рынке // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2024. Т. 14. № 3-1. С. 299–307. EDN: WKOFUR

9. Мurodov C.A. Внедрение искусственного интеллекта в бизнес-процессы: перспективы для малых и средних предприятий в развивающихся странах // *Raqamli iqtisodiyot*. 2025. № 10. С. 63–77. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-iskusstvennogo-intellekta-v-biznes-protsessy-perspektivy-dlya-malyh-i-sre>

dnih-predpriyatiy-v-razvivayuschihsya-stranah (дата обращения: 30.03.2025).

10. *Pingili R.* AI-driven intelligent document processing for banking and finance // *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*. 2025. Vol. 7 No. 2. P. 98–109. <http://doi.org/10.51594/ijmer.v7i2.1802>

11. *Кирилюк И.Л.* Методы интеллектуального анализа данных и регулирование цифровой трансформации финансового сектора в России и в мире // *Вестник Института экономики Российской академии наук*. 2020. № 4. С. 152–165. <http://doi.org/10.24411/2073-6487-2020-10048> EDN: YVWFOY

12. *Вошев Д.В., Вошева Н.А., Шепель Р.Н., Сон И.М., Драпкина О.М.* Сравнительный анализ использования электронных технологий Интернета вещей в сфере здравоохранения зарубежных стран и России // *Менеджер здравоохранения*. 2023. № 8. С. 44–53. <http://doi.org/10.21045/1811-0185-2023-8-44-53> EDN: KBFHTM

13. *Заславская В.Л.* Прикладной системный анализ как инструмент для достижения предметных целей в бизнес аналитике // *Хроноэкономика*. 2022. № 4 (38). С. 51–65. EDN: SKDSYE

14. *Akter S., Bandara R., Hani U., Wamba S. F., Foropon C., Papadopoulos T.* Analytics-based decision-making for service systems: A qualitative study and agenda for

future research // *International Journal of Information Management*. 2019. Vol. 48. P. 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.01.020>

15. *Матюш И.В.* Применение нейронных сетей при мониторинге и прогнозировании финансовых потоков // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Д. Экономические и юридические науки* 2024. № 2 (67). С. 16–20. <http://doi.org/10.52928/2070-1632-2024-67-2-16-20> EDN: CWAZFR

16. *Gu Sh., Kelly B.T., Xiu D.* Empirical Asset Pricing via Machine Learning / 31st Australasian Finance and Banking Conference. 2019. Paper No. 18-04. <http://doi.org/10.2139/ssrn.3159577>

17. *Назипов Р.С.* Перспективы применения искусственного интеллекта в оптимизации бизнес-процессов компаний // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2024. № 7-3 (94). С. 179–185. <http://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-7-3-179-185> EDN: TXWTNE

18. *Саввин А.А., Немцев Д.С., Драгуленко В.В.* Применение машинного обучения в прогнозировании экономического роста // *Журнал прикладных исследований*. 2023. № 12. С. 91–96. http://doi.org/10.47576/2949-1878_2023_12_91 EDN: JHNUTF

Сведения об авторах

Чаплыгина Елизавета Игоревна, магистрант кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0002-7037-0317; e-mail: 1132236525@pfur.ru

Круглова Лариса Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 2920-9463, ORCID: 0000-0002-8824-1241; e-mail: kruglova-lv@rudn.ru

Главина Софья Григорьевна, кандидат экономических наук, доцент кафедры политической экономики им. В. Станислава, экономический факультет, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 4511-1442, ORCID: 0000-0002-5174-8962; e-mail: glavina_sg@pfur.ru

About the authors

Elizaveta I. Chaplygina, Master's student at the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0002-7037-0317; e-mail: 1132236525@pfur.ru

Larisa V. Kruglova, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2920-9463, ORCID: 0000-0002-8824-1241; e-mail: kruglova-lv@rudn.ru

Sofya G. Glavina, PhD in Economics, Associate Professor Political Economy named after V. Stenis, Faculty of Economics, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 4511-1442, ORCID: 0000-0002-5174-8962; e-mail: glavina_sg@pfur.ru