



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

2024 Том 25 № 4

DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-4

<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

Кавазутти 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)

Периодичность: 4 выпуска в год (ежеквартально).

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

Языки: русский, английский.

Журнал индексируют: РИНЦ, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View, 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*
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 19.12.2024. Выход в свет 30.12.2024. Формат 60×84/8.

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

Усл. печ. л. 15,11. Тираж 500 экз. Заказ № 1713. 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

2024 Volume 25 Number 4

DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-4

<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, East View, 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*
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

Рейзмунт Е.М., Доронин С.В. Возможности построения расчетных нагрузочных диаграмм спирально-тросового амортизатора при изменении направления действия сил инерции	337
Ermilov A.S., Saltykova O.A. Methods of a Priori Statistical Analysis of Disturbed Motion of Aircraft in Turbulent Environments (Методы априорного статистического анализа возмущенного движения летательных аппаратов в турбулентных средах)	348
Меркулов А.А. Экспертная система поддержки принятия решений в области строительства	357
Миронова Л.И., Колесник О.А., Босак Д.Б. Численное моделирование контактного взаимодействия профилированных металлических уплотнений во фланцевых соединениях авиационной техники	368
Журавлев А.О., Поляков А.О., Андриков Д.А. Методы вибродиагностики. От способов получения данных до их обработки современными средствами	380
Khudhair H.S., Al-Jameel H.A.E., Konoplev V.N., Asoyan A.R. Classification Characteristics of Some Roads in Karbala City (Классификационные характеристики некоторых дорог в городе Кербела)	397
Ганьшин А.С., Андриков Д.А. Исследование математической модели биоискусственной печени с использованием ПИД-регулятора	405
Сулов В.А., Гагарский С.В. Автоматизированная посадка беспилотного летательного аппарата на подвижную платформу с использованием нейронных сетей	413
Korsun O.N., Om M.H. Real Time Estimation of the Wind Speed Components Based on Measurement Data from Satellite Navigation and Barometric Measurements (Идентификация скорости ветра в режиме реального времени на основе данных спутниковой навигации и барометрических измерений)	427
Гольдштейн С.Л., Полозов А.А., Папуловская Н.В., Мальцева Н.А., Краев М.В. Модель управления соревновательной деятельностью команд топ-уровня на основе компьютерного зрения в онлайн	441

CONTENTS

Reizmunt E.M., Doronin S.V. Possibilities of Constructing Design Load Diagrams of a Helical Cable Shock Damper When the Direction of Inertia Forces Changes	337
Ermilov A.S., Saltykova O.A. Methods of a Priori Statistical Analysis of Disturbed Motion of Aircraft in Turbulent Environments	348
Merkulov A.A. Expert Decision Support System in the Field of Construction	357
Mironova L.I., Kolesnik O.A., Bosak D.B. Numerical Modelling of Contact Interaction of Profiled Metal Gaskets in Aircraft Flange Connections	368
Zhuravlev A.O., Polyakov A.O., Andrikov D.A. Vibration Diagnostic Methods. From Methods of Obtaining Data to Processing It Using Modern Means	380
Khudhair H.S., Al-Jameel H.A.E., Konoplev V.N., Asoyan A.R. Classification Characteristics of Some Roads in Karbala City	397
Ganshin A.S., Andrikov D.A. Investigation of a Mathematical Model of a Bio-Artificial Liver Using a PID-controller	405
Suslov V.A., Gagarsky S.V. Automated Landing of an Unmanned Aerial Vehicle on a Mobile Platform Using Neural Networks	413
Korsun O.N., Om M.H. Real Time Estimation of the Wind Speed Components Based on Measurement Data from Satellite Navigation and Barometric Measurements	427
Goldstein S.L., Polozov A.A., Papulovskaya N.V., Maltseva N.A., Kraev M.V. A Model for Managing the Competitive Activities of Top-Level Teams Based on Computer Vision Online	441



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-4-337-347

УДК 62-567

EDN: EPVUJA

Научная статья / Research article

Возможности построения расчетных нагрузочных диаграмм спирально-тросового амортизатора при изменении направления действия сил инерции

Е.М. Рейзмунт^{ID}, С.В. Доронин^{ID}✉

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Красноярск, Россия
✉ mr.svdoronin@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 14 июня 2024 г.

Доработана: 6 августа 2024 г.

Принята к публикации: 15 августа 2024 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

Аннотация. В настоящее время для описания жесткостных характеристик тросовых амортизаторов используются экспериментальные нагрузочные диаграммы в нескольких основных направлениях восприятия нагрузки. При этом направление действие сил инерции по отношению к системе амортизации может быть произвольным. Идея построения расчетных нагрузочных диаграмм при изменении направления действия нагрузки заключается в интерполяции экспериментальных нагрузочных диаграмм, находящихся в плоскости, в которой изменяется направление действия нагрузки. Для построения расчетных нагрузочных диаграмм используются два принципиально различных подхода: непосредственное их интерполирование и интерполирование модуля Юнга изотропного кривого брусамимитатора троса с последующим его отображением в численной модели, его многовариантным компьютерным анализом и построением расчетных нагрузочных диаграмм. Приведены примеры построения расчетных нагрузочных диаграмм при изменении направления действия нагрузки. Определены ограничения применения указанного подхода.

Ключевые слова: система амортизации, статический расчет, моделирование троса, жесткость амортизатора, многомодельный подход

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий, № 122010800028-4 «Разработка и анализ информационных и вычислительных технологий в задачах мониторинга и создания цифровых двойников различных явлений и объектов».

Для цитирования

Рейзмунт Е.М., Доронин С.В. Возможности построения расчетных нагрузочных диаграмм спирально-тросового амортизатора при изменении направления действия сил инерции // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 4. С. 337–347. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-337-347>



Possibilities of constructing design load diagrams of a helical cable shock damper when the direction of inertia forces changes

Elena M. Reizmunt^{ID}, Sergey V. Doronin^{ID}✉

Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Krasnoyarsk, Russia

✉ mr.svdoronin@yandex.ru

Article history

Received: June 14, 2024

Revised: August 6, 2024

Accepted: August 15, 2024

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution

Undivided co-authorship.

Abstract. Currently, experimental load diagrams in several main directions of load perception are used to describe the stiffness characteristics of cable shock dampers. In this case, the direction of the action of inertia forces in relation to the damping system can be arbitrary. The idea of constructing calculated load diagrams when the direction of load action changes is to interpolate experimental load diagrams located in the plane in which the direction of load action changes. To construct design load diagrams, two fundamentally different approaches are used: their direct interpolation and interpolation of the Young's modulus of an isotropic curved beam-cable simulator with its subsequent display in a numerical model, its multivariate computer analysis and construction of design load diagrams. Examples of constructing calculated load diagrams when changing the direction of the load are given. The limitations of using this approach are determined.

Keywords: damping system, static calculation, cable modeling, damper stiffness, multi-model approach

Financing

The work was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for the Federal Research Center for Information and Computing Technologies, No. 122010800028-4 "Development and analysis of information and computing technologies in the tasks of monitoring and creating digital counterparts of various phenomena and objects."

For citation

Reizmunt EM, Doronin SV. Possibilities of constructing design load diagrams of a helical cable shock damper when the direction of inertia forces changes. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(4):337–347 (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-337-347>

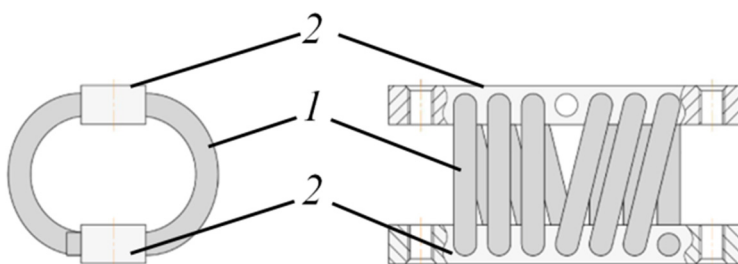
Введение

В настоящее время при разработке систем амортизации широкое распространение получили тросовые амортизаторы с пространственным восприятием нагрузок, основанные на использовании стального троса в качестве упругого и демпфирующего элемента. Обоснование конструктивных решений и количественных характеристик таких систем должно осуществляться на основе общепринятых и общеизвестных методов проектирования и расчета систем амортизации с учетом специфических особенностей механических свойств и поведения

тросовых амортизаторов. В исследовании эти особенности рассматриваются на примере одного, наиболее распространенного типа тросовых амортизаторов, а именно — спирально-тросовых (рис. 1). Далее, говоря о тросовых амортизаторах, будем иметь в виду именно этот тип устройств. Традиционно статический расчет систем амортизации выполняется на начальном этапе их разработки и предназначен для рационального выбора количества и способа размещения амортизаторов в составе системы [1; 2]. Исходные данные для расчета включают характеристики жесткости амортизаторов, величины и направления сил инерции.



a



б

Рис. 1. Спирально-тросовый амортизатор:
a — внешний вид; *б* — конструктивная схема (1 — трос; 2 — планки)
 Источник: выполнено Е.М. Рейзмунт, С.В. Дорониным

Figure 1. Helical cable shock damper:
a — appearance; *б* — design diagram (1 — cable; 2 — bars)
 Source: made by E.M. Reizmundt, S.V. Doronin

Характерной особенностью тросовых амортизаторов является нелинейность жесткостных характеристик, описываемая нагрузочной диаграммой $F = f(s)$, выражающей взаимосвязь нагрузки F , приложенной к одной из планок, и прогиба s — перемещения этой планки в направлении действия нагрузки [3]. Сложное нелинейное поведение тросовых амортизаторов иллюстрируется их нагрузочными диаграммами, содержащимися в номенклатурных каталогах отечественных и зарубежных производителей¹.

Силы инерции являются выражением всего комплекса воздействий, которые могут быть сведены к статическим нагрузкам² [1]. В качестве таких воздействий рассматривают собственный вес (всегда) и силы инерции вследствие линейных ускорений (в ряде случаев поступательного и вращательного движения). В большинстве случаев направления сил инерции известны — вертикальное для собственного веса, горизонтальные вдоль и перпендикулярно тра-

ектории движения для линейных ускорений. Для этих случаев рекомендован ряд типовых схем расположения тросовых амортизаторов по отношению к направлению действия силы инерции (рис. 2, *a*)³.

Таким образом, можно выделить небольшое количество основных направлений, вдоль которых тросовый амортизатор будет воспринимать статическую нагрузку. На рис. 2, *б* в качестве примера показаны четыре таких направления. Таким образом, имеем три нагрузочные диаграммы в плоскости XY (направления 1, 2 и 3), две — в плоскости YZ (направления 1 и 4) и две в плоскости XZ (направления 3 и 4). Именно для этих направлений чаще всего экспериментально определяются и приводятся в номенклатурных каталогах¹ паспортные нагрузочные диаграммы как нелинейные характеристики жесткости амортизаторов. Они позволяют однозначно охарактеризовать перемещения амортизируемого объекта под действием сил инерции в этих направлениях.

¹ См.: Астрон. Виброизоляция электроники на транспорте. URL: <https://dempfer.ru> (дата обращения: 12.03.2021); Socitec. Socitec's expertise & creative solutions. URL: <https://socitec.com/> (accessed: 03.05.2024); Enidine. Shock Absorbers and Vibration Isolation Products. URL: <https://www.enidine.com> (accessed: 03.05.2024); Hutchinson. URL: <https://stop-choc.de> (accessed: 03.05.2024). Dpflex. URL: <https://en.dpflex.com/> (accessed: 03.05.2024).

² Бацула А.П. Конструирование радиоэлектронных устройств : учебное пособие. Томск : Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2002. 231 с.

³ ИНМОП. URL: <http://inmor.ru/> (дата обращения: 04.05.2024).

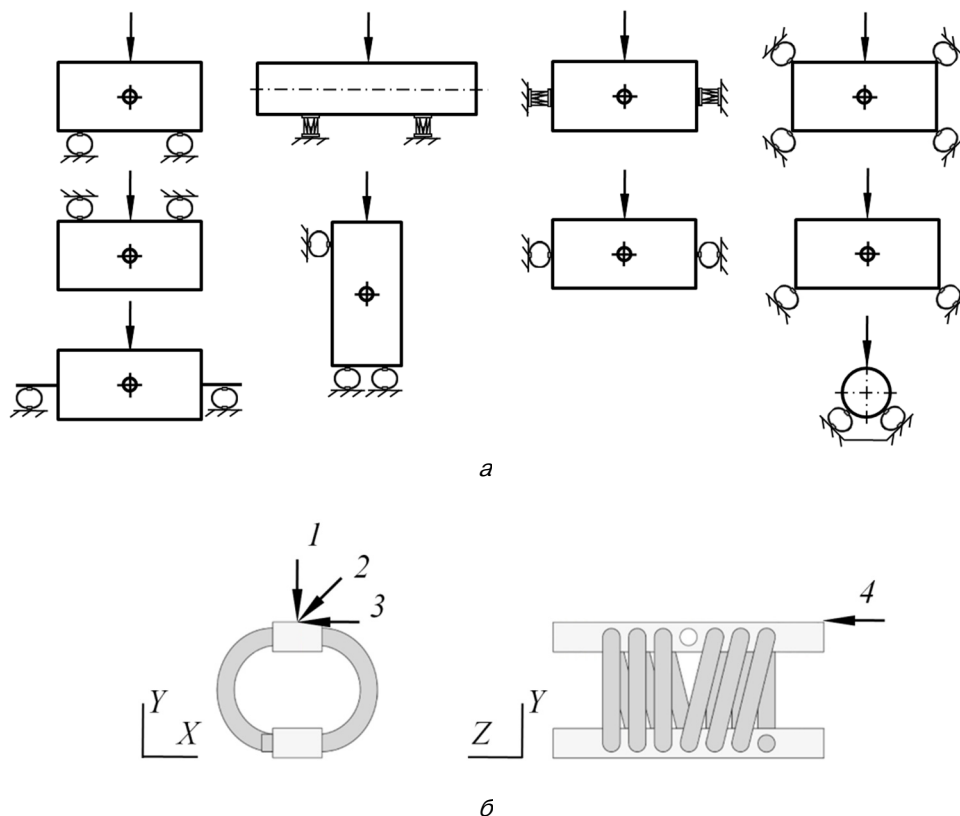


Рис. 2. Работа амортизаторов в составе системы:

a — типовые конфигурации систем амортизации; *б* — основные направления восприятия нагрузки (1 — сжатие; 2 — сжатие под углом 45°; 3 — поперечный сдвиг; 4 — продольный сдвиг)

Источники: выполнено Е.М. Рейзмунт, С.В. Дорониным

Figure 2. Operation of shock dampers as part of the system:

a — typical configurations of the shock damping systems; *б* — main directions of load perception (1 — compression; 2 — compression at an angle of 45°; 3 — roll; 4 — shear)

Source: made by E.M. Reizmunt, S.V. Doronin

Для некоторых объектов и условий эксплуатации при поступательном и вращательном движении возможно возникновение линейных ускорений (перегрузок) в произвольном направлении (под некоторыми углами по отношению к осям декартовой системы координат, связанной с системой амортизации и согласованной с основными направлениями действия сил инерции). Это делает необходимым получение достоверной информации о жесткости (нагрузочных диаграммах) для этих направлений сил инерции. Организация получения соответствующих экспериментальных данных обычно затруднительна из-за временных ограничений и отсутствия специальной оснастки для проведе-

ния механических испытаний с варьированием угла приложения нагрузки. В связи с этим актуальны обоснование и разработка инструмента адаптации паспортных нагрузочных диаграмм к изменению направления действия инерционных сил.

1. Тросовый амортизатор как механическая система и объект исследования

В наиболее простой конструктивной реализации тросовый амортизатор состоит из трех основных элементов — двух планок и соединяющего их троса (см. рис. 1). Трос имеет сложные свойства, внутреннюю структуру (количество

и характеристики проволок и прядей, направления и шаг их свивки) и пространственную конфигурацию, регулярные механические связи с планками на разных участках своей длины. Таким образом, трос как элемент механической системы «тросовый амортизатор» является подсистемой с большим количеством структурных элементов и связей. Структура троса как подсистемы оказывается гораздо более сложной, чем структура надсистемы (тросового амортизатора в целом как макрообъекта).

Сложность механического поведения амортизатора обусловлена свойствами тросового элемента (внутренней структурой троса, его пространственной конфигурацией) и связями механической системы (количеством и пространственным расположением соединений троса и планок). Она выражается не только нелинейностью жесткостных характеристик, но и их анизотропией: для разных схем нагружения (направлений сил инерции) нагрузочные диаграммы могут существенно отличаться как количественно, так и качественно. Предположительно именно структура троса и его пространственная конфигурация определяют степень нелинейности и анизотропию жесткости амортизатора, но выделить вклад каждого из этих факторов затруднительно.

В силу большого числа структурных элементов троса и связей между ними в настоящее время не удастся построить аналитическую модель жесткости тросового амортизатора. Известные модели [4–6] получены только для единственной схемы нагружения (сжатие) и не обладают прогностическими возможностями для произвольного направления действия нагрузки. Разработка численных (конечно-элементных) моделей, учитывающих все системные эффекты механического поведения троса [7–9], сталкивается с очень высокими требованиями к вычислительным ресурсам вследствие чрезвычайно большой размерности решаемых

задач, что приводит к необходимости упрощений и допущений, выхолащивающих смысл и потенциальные возможности полномасштабного вычислительного моделирования.

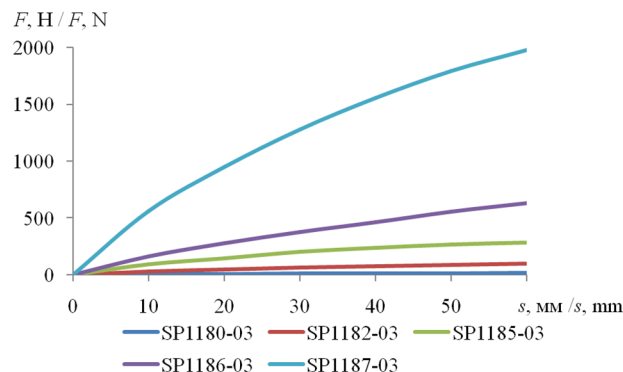


Рис. 3. Нагрузочные диаграммы амортизаторов HUTCHINSON разных типоразмеров при сжатии (по данным Hutchinson: <https://stop-choc.de>)
Источники: выполнено Е.М. Рейзмунт, С.В. Дорониным
Figure 3. Load diagrams of HUTCHINSON shock dampers of different sizes under compression (according to data from Hutchinson: <https://stop-choc.de>)
Source: made by E.M. Reizmunt, S.V. Doronin

Таким образом, несмотря на конструктивную простоту тросовых амортизаторов, фактически единственным достоверным источником информации об их жесткостных характеристиках является экспериментальное построение нагрузочных диаграмм. Анализ таких диаграмм⁴ демонстрирует физически обусловленные, количественно различные, но качественно идентичные зависимости. Количественное различие выражается для каждой схемы нагружения смещением нагрузочных диаграмм по оси ординат в зависимости от грузоподъемности амортизатора: на рис. 3 в качестве примера приведены нагрузочные диаграммы амортизаторов HUTCHINSON при сжатии. Качественная идентичность заключается в том, что независимо от типоразмера (грузоподъемности) амортизатора для случаев вертикального сжа-

⁴ Астрон. Виброизоляция электроники на транспорте. URL: <https://dempfer.ru> (accessed: 12.03.2021); Socitec. Socitec's expertise & creative solutions. URL: <https://socitec.com/> (accessed: 03.05.2024); Enidine. Shock Absorbers and Vibration Isolation Products. URL: <https://www.enidine.com> (дата обращения: 03.05.2024); Hutchinson. URL: <https://stop-choc.de> (accessed: 03.05.2024). Dpflex. URL: <https://en.dpflex.com/> (дата обращения: 03.05.2024).

тия и сжатия под углом 45° все диаграммы выпуклы (одно и то же приращение силы F вызывает все больший прогиб s), для случаев поперечного и продольного сдвига — вогнуты (одно и то же приращение силы F вызывает все меньший прогиб s). Они отражают следующую закономерность системного поведения тросового амортизатора: за исключением области малых нагрузок и прогибов с ростом нагрузки его сопротивление деформированию снижается при сжатии и растет при сдвиге (рис. 4). Эта закономерность является предпосылкой прогнозирования деформирования амортизатора при изменении направления действия нагрузки.

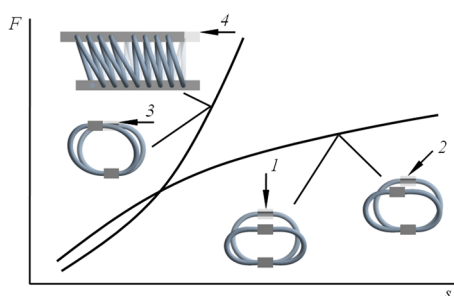


Рис. 4. Качественный характер нагрузочных диаграмм при различных направлениях нагружения
Источники: выполнено Е. М. Рейзмунт, С. В. Дорониным

Figure 4. Qualitative nature of load diagrams for different loading directions

Source: made by E. M. Reizmunt, S. V. Doronin

2. Идея построения расчетных нагрузочных диаграмм при изменении направления действия нагрузки

Обоснование осуществляется на правдоподобных [10] и не противоречащих физической и технической природе тросовых амортизаторов рассуждениях. В результате этих рассуждений и рассмотрения экспериментально полученных паспортных нагрузочных диаграмм⁵ сформулированы следующие основные умозаключения относительно плавного и монотонного их изменения:

– небольшое изменение угла α приложения нагрузки приведет к небольшому качественному и количественному изменению соответствующей нагрузочной диаграммы;

– если для углов α приложения нагрузки выполняется условие $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3$, то нагрузочная диаграмма для угла α_2 находится внутри области, ограниченной нагрузочными диаграммами для углов α_1 и α_3 ;

– зная нагрузочные диаграммы $F_{\alpha_1} = f(s)$ и $F_{\alpha_3} = f(s)$ для углов α_1 и α_3 , нагрузочную диаграмму $F_{\alpha_2} = f(s)$ для угла α_2 можно получить путем интерполяции (рис. 5).

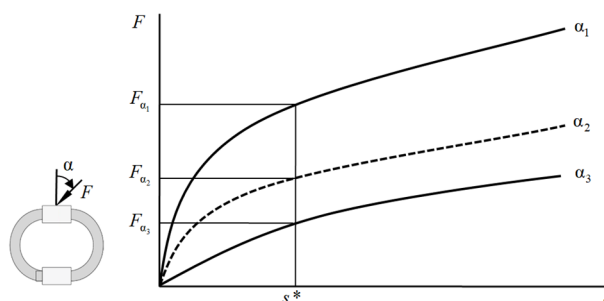


Рис. 5. Нагрузочная диаграмма в связи с направлением приложения нагрузки

Источники: выполнено Е.М. Рейзмунт, С.В. Дорониным
Figure 5. Load diagram due to direction of load application
Source: made by E.M. Reizmunt, S.V. Doronin

Таким образом, идея построения расчетных нагрузочных диаграмм при изменении направления действия нагрузки заключается в интерполяции экспериментальных нагрузочных диаграмм, находящихся в плоскости, в которой изменяется направление действия нагрузки. При изменении направления действия нагрузки в плоскости XY интерполяция осуществляется на базе трех экспериментальных нагрузочных диаграмм для направлений 1, 2 и 3 (рис. 2, б), в плоскостях YZ и XZ — на базе пары диаграмм для направлений 1 и 4, 3 и 4 соответственно. На базе трех экспериментальных диаграмм может

⁵См.: Астрон. Виброизоляция электроники на транспорте. URL: <https://dempfer.ru> (accessed: 12.03.2021); Socitec. Socitec's expertise & creative solutions. URL: <https://socitec.com/> (accessed: 03.05.2024); Enidine. Shock Absorbers and Vibration Isolation Products. URL: <https://www.enidine.com> (accessed: 03.05.2024); Hutchinson. URL: <https://stop-choc.de> (accessed: 03.05.2024); Dpflex. URL: <https://en.dpflex.com/> (accessed: 03.05.2024).

быть выполнена нелинейная интерполяция, на базе двух — только линейная. Тогда расчетная нагрузочная диаграмма в общем случае имеет вид $F_\alpha = f(s, \alpha)$, то есть зависит от угла изменения направления действия нагрузки относительно направления, соответствующего одной из нагрузочных диаграмм.

3. Варианты подходов к построению расчетных нагрузочных диаграмм

Как показывает практика построения экспериментальных нагрузочных диаграмм⁶, угол приложения нагрузки F изменяется с шагом 45° или 90° . При таких больших шагах изменения угла соответствующие экспериментальные диаграммы существенно отличаются. В этом случае точность интерполяции по ограниченному числу точек (две или три экспериментальные диаграммы) предположительно будет невысокой. Тогда целесообразно получение дополнительных (гибридных) нагрузочных диаграмм, сочетающих в себе результаты как экспериментального определения, так и математического (конечно-элементного) моделирования деформирования амортизаторов. Их предназначение — повысить точность построения расчетных нагрузочных диаграмм для произвольного угла приложения нагрузки.

Технология построения и численной реализации трехмерной конечно-элементной модели тросового амортизатора [11] основана на идее максимально полного учета его пространственной геометрии с заменой тросового элемента изотропным кривым брусом с эквивалентной в некотором смысле жесткостью. Предположительно в этом случае возможно в полной мере учесть вклад пространственной конфигурации троса в формирование нелинейности и анизотропии жесткости амортизатора. Вклад структуры троса предполагается учесть модулем Юнга E изотропного кривого бруса

как интегральной характеристикой жесткости троса в составе амортизатора: для каждого значения нагрузки F в результате многовариантных вычислительных экспериментов можно найти такое «эквивалентное» значение E изотропного кривого бруса, при котором расчетный прогиб s окажется соответствующим экспериментальной нагрузочной диаграмме для этого значения F . Адекватность такой замены троса изотропным кривым брусом с варьируемым модулем Юнга подтверждается приемлемым совпадением результатов математического и натурного экспериментов по анализу динамического поведения макета на вибростенде при малых амплитудах колебаний [12].

Таким образом, появляется возможность каждой экспериментальной нагрузочной диаграмме поставить в соответствие зависимость $E = f(s)$ «эквивалентного» модуля Юнга изотропного кривого бруса-имитатора троса в составе конечно-элементной модели амортизатора. Примечательно, что выражения $F = f(s)$ и $E = f(s)$ описывают одну и ту же нелинейную зависимость жесткости амортизатора от величины прогиба $k(s) = F / s$, а между E и k существует линейная зависимость $E = f(k)$.

Тогда принципиально различными являются следующие два подхода к построению расчетных нагрузочных диаграмм:

- непосредственное их интерполирование (для каждого значения прогиба s соответствующее значение F_{sa} расчетной диаграммы определяется как результат интерполяции в диапазоне $[F_{s \min}; F_{s \max}]$ экспериментальных нагрузочных диаграмм);

- интерполирование модуля Юнга изотропного кривого бруса-имитатора троса с последующим его отражением в численной модели, ее многовариантным компьютерным анализом и построением расчетных нагрузочных диаграмм.

⁶См.: Астрон. Виброизоляция электроники на транспорте. URL: <https://dempfer.ru> (accessed: 12.03.2021); Socitec. Socitec's expertise & creative solutions. URL: <https://socitec.com/> (accessed: 03.05.2024); Enidine. Shock Absorbers and Vibration Isolation Products. URL: <https://www.enidine.com> (accessed: 03.05.2024); Hutchinson. URL: <https://stop-choc.de> (accessed: 03.05.2024); Dpflex. URL: <https://en.dpflex.com/> (accessed: 03.05.2024).

Каждый из этих подходов может быть реализован в линейной или нелинейной постановке в зависимости от количества имеющихся экспериментальных нагрузочных диаграмм в плоскости изменения направления приложения нагрузки.

4. Примеры практического построения расчетных нагрузочных диаграмм при изменении направления действия нагрузки

Рассмотрим варианты практического построения расчетных нагрузочных диаграмм на примере тросового амортизатора ВМТ-350¹. Для него известны экспериментальные диаграммы для направлений 1, 2 и 3 ($\alpha = 0^\circ, 45^\circ$ и 90° соответственно) действия нагрузки в плоскости ХУ. Построение и исследование трехмерной модели амортизатора в диапазоне прогибов до 13 мм позволило установить линейные зависимости модуля Юнга бруса-имитатора троса от жесткости k для каждой экспериментальной диаграммы (рис. 6).

Результаты построения расчетных нагрузочных диаграмм отражены в графической форме на рис. 7–9: сплошными линиями показаны экспериментальные диаграммы, пунктирными — расчетные.

Вариант 1 заключается в получении расчетных диаграмм путем непосредственного нелинейного интерполирования трех экспериментальных диаграмм с помощью полинома второго порядка: на рис. 7, а в качестве примера показан интерполирующий полином для

$s = 7$ мм. В этом случае расчетные диаграммы для углов α , равных 15° и $30^\circ, 60^\circ$ и 75° , ограничены областями экспериментальных диаграмм для углов 0° и $45^\circ, 45^\circ$ и 90° соответственно (рис. 7, б). Расчетные диаграммы демонстрируют закономерности, характерные для экспериментальных диаграмм, а именно: с увеличением угла приложения нагрузки от 0° до 90° интенсивность снижения жесткости уменьшается. Это проявляется в уменьшении «расстояния» между смежными диаграммами при постоянном шаге изменения угла α . Визуально семейство расчетных и экспериментальных нагрузочных диаграмм в диапазоне углов от 0° до 90° с шагом 15° выглядит так, как если бы каждая диаграмма плавно переходила в смежную к ней с изменением угла α . Расчетные диаграммы выглядят весьма правдоподобно и соответствуют интуитивно ожидаемым.

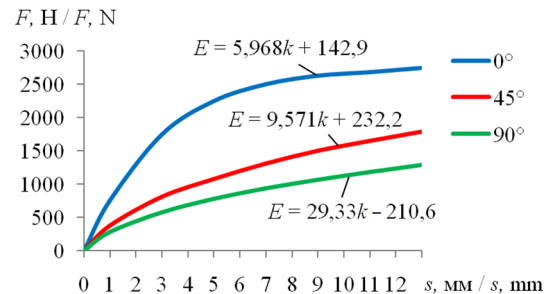


Рис. 6. Экспериментальные нагрузочные диаграммы амортизатора ВМТ-350 и соответствующие им зависимости $E = f(k)$
Источники: выполнено Е.М. Рейзмунт, С.В. Дорониным
Figure 6. Experimental load diagrams of BMT-350 shock absorber and corresponding dependencies $E = f(k)$
Source: made by E.M. Reizmunt, S.V. Doronin

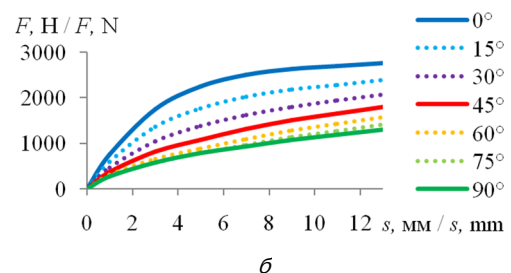
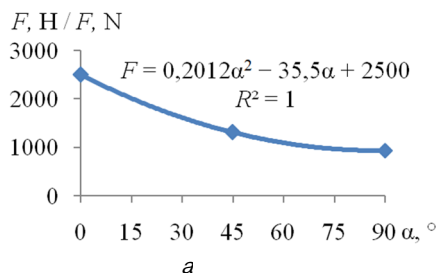


Рис. 7. Расчетные диаграммы, полученные путем полиномиальной интерполяции экспериментальных диаграмм:
а — интерполирующий полином; б — семейство нагрузочных диаграмм
Источники: выполнено Е.М. Рейзмунт, С.В. Дорониным

Figure 7. Calculated diagrams obtained by polynomial interpolation of experimental diagrams:
а — interpolating polynomial; б — load diagram family
Source: made by E.M. Reizmunt, S.V. Doronin

Вариант 2 предполагает получение расчетных диаграмм путем многовариантного численного анализа конечно-элементной модели амортизатора при различных углах α приложения нагрузки. При этом модуль Юнга бруса-имитатора троса для каждого значения прогиба s определяется интерполирующим полиномом второго порядка соответствующих значений модуля Юнга, полученных для трех экспериментальных диаграмм: на рис. 8, *а* в качестве примера показан интерполирующий полином для $s = 7$ мм. Как видно из полученных результатов (рис. 8, *б*), отсутствует эффект плавного количественного и качественного изменения расчетных диаграмм, отмеченный в варианте 1. «Расстояния» между диаграммами для углов 0° и 15° , 15° и 30° , 30° и 45° примерно одинаковы.

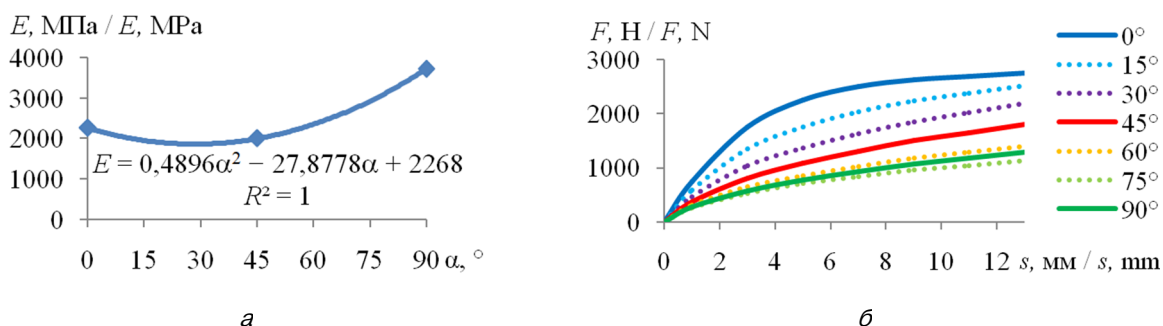


Рис. 8. Расчетные диаграммы, полученные многовариантным конечно-элементным моделированием амортизатора с полиномиальной интерполяцией модуля Юнга бруса-имитатора троса:
а — интерполирующий полином; *б* — семейство нагрузочных диаграмм
И с т о ч н и к: выполнено Е.М. Рейзмунт, С.В. Дорониным

Figure 8. Calculation diagrams obtained by multivariate finite element modeling of a shock damper with polynomial interpolation of the Young's modulus of the cable imitation beam:
a — interpolating polynomial; *b* — family of load diagrams
S o u r c e: made by E.M. Reizmund, S.V. Doronin

Вариант 3 отличается от варианта 2 тем, что во внимание принимались не три, а две экспериментальные диаграммы — для направлений 1 и 2 ($\alpha = 0^\circ$ и 90° соответственно). Цель заключается в анализе результатов в случае, когда по двум экспериментальным диаграммам осуществляется линейное интерполирование модуля Юнга кривого бруса-имитатора троса с последующим многовариантным конечно-элементным моделированием: на рис. 9, *а* в каче-

Расчетная диаграмма для угла 60° весьма близка к экспериментальной для угла 90° , а расчетная — для угла 75° оказывается ниже экспериментальной для угла 90° .

Интерпретировать полученные результаты можно следующим образом. Построение интерполирующего полинома по трем точкам (экспериментальным диаграммам) не обеспечивает точность, необходимую для построения расчетных диаграмм, особенно в области относительно небольших изменений жесткости при увеличении угла α . Это явно заметно преимущественно в диапазоне углов от 45° до 90° . В диапазоне углов от 0° до 45° , очевидно, погрешность также присутствует, но визуально не проявляется из-за большого «расстояния» экспериментальных диаграмм для этих углов.

стве примера показана интерполирующая прямая для $s = 7$ мм. В качестве результата рассматривается единственная расчетная диаграмма, построенная для $\alpha = 45^\circ$ для сравнения с экспериментальной диаграммой для этого же направления. Из полученных результатов (рис. 9, *б*) видно настолько большое несоответствие расчетных и экспериментальных данных, что расчетная диаграмма, очевидно, непригодна для использования в инженерных расчетах.

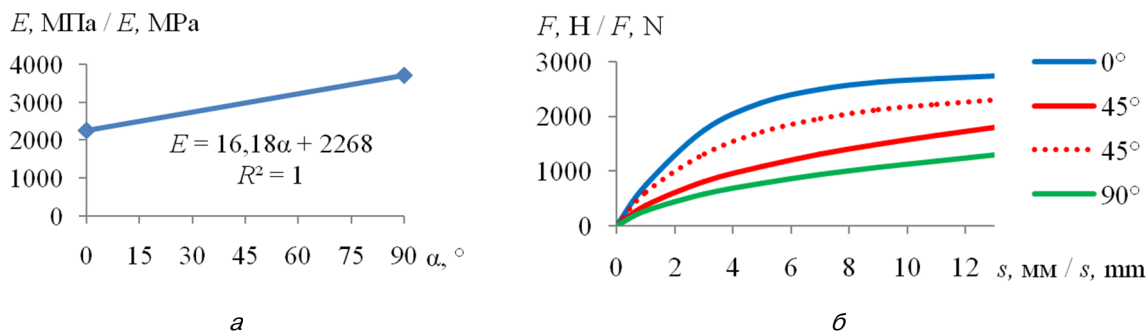


Рис. 9. Расчетная диаграмма, полученная многовариантным конечно-элементным моделированием амортизатора с линейной интерполяцией модуля Юнга бруса-имитатора троса:

a — интерполирующий полином; b — семейство нагрузочных диаграмм

И с т о ч н и к: выполнено Е.М. Рейзмунт, С.В. Дорониным

Figure 9. Calculation diagram obtained by multivariate finite element modeling of a shock absorber with linear interpolation of the Young's modulus of the cable imitation beam:

a — interpolating polynomial; b — family of load diagrams

S o u r c e: made by E.M. Reizmunt, S.V. Doronin

Заклучение

Исходя из рассмотрения физико-технических закономерностей механического поведения спирально-тросовых амортизаторов при изменении направления действия сил инерции исследованы возможности построения расчетных нагрузочных диаграмм путем интерполяции данных как экспериментальных нагрузочных диаграмм, так и результатов численного анализа деформирования трехмерных моделей амортизаторов.

Установлено, что при статическом нагружении в широком диапазоне изменения направлений действия сил инерции учет вклада пространственной конфигурации троса в формирование нелинейности и анизотропии жесткости амортизатора недостаточен. Показано, что при наличии только двух экспериментальных диаграмм построение расчетных с приемлемой точностью невозможно. Приемлемая точность результатов может быть получена, если в плоскости изменения угла приложения имеется не менее трех экспериментальных нагрузочных диаграмм. В этом случае наиболее экономичный и эффективный вариант построения расчетных диаграмм заключается в непосредственной нелинейной интерполяции экспериментальных данных.

Список литературы

1. Ильинский В.С. Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий. Москва : Радио и связь, 1982. 296 с.
2. Григорьев Н.В. Вибрация энергетических машин : справочное пособие. Ленинград : Машиностроение, 1974. 464 с.
3. Ильинский В.С. Защита аппаратов от динамических воздействий. Москва : Энергия, 1970. 320 с.
4. Balaji P.S., Moussa L., Rahman M.E., Ho L.H. An analytical study on the static vertical stiffness of wire rope isolators // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2016. Vol. 30. No. 1. P. 287–295. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-1232-5>
5. Пономарев Ю.К., Посохов П.В. Разработка математической модели тросового виброизолятора с ансамблем элементов радиусно-прямолинейной конфигурации // *Новые материалы и технологии в машиностроении*. 2013. № 18. С. 105–110. EDN: RZGLZF
6. Пономарев Ю.К., Посохов П.В., Симаков О.Б. Разработка методики расчета характеристик тросового виброизолятора с радиусным и прямолинейными участками осевой линии // *Новые материалы и технологии в машиностроении*. 2014. № 20. С. 66–74. EDN: SXXVXV
7. Kastratović G.M., Vidanović N.D. Some Aspects of 3D Finite Element Modeling of Independent Wire Rope Core // *FME Transactions*. 2011. Vol. 39. No. 1. P. 37–40.
8. Gai J., Yan K., Deng Q., Sun M., Ye F. A Finite Element Model for a $6 \times K31WS + FC$ Wire Rope and a Study on Its Mechanical Responses with or without Wire Breakage // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. No. 14. P. 8407. <https://doi.org/10.3390/app13148407>

9. Cen B., Lu X., Zhu X. Research of numerical simulation method on vertical stiffness of polycal wire rope isolator // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018. Vol. 32. No. 6. P. 2541–2549. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0511-3>

10. Поля Д. Математика и правдоподобные рассуждения. Москва : Наука, 1975. 464 с.

11. Доронин С.В. Линеаризация жесткости трехмерной модели тросового виброизолятора при анализе динамического поведения системы амортизации // Материалы конференции «Ляпуновские чтения 2023». Иркутск : ИДСТУ СО РАН, 2023. С. 28–30.

12. Доронин С.В., Рейзмунт Е.М., Похабов Ю.П. Компьютерное моделирование виброиспытаний системы амортизации на тросовых виброизоляторах // Автоматизация. Современные технологии. 2023. Т. 77. № 12. С. 550–555. <https://doi.org/10.36652/0869-4931-2023-77-12-550-555>

References

1. Il'inskij VS. *Protection of Radio Electronic Equipment and Precision Equipment from Dynamic Impacts*. Moscow: Radio i svyaz' Publ.; 1982. (In Russ.)

2. Grigor'ev NV. *Vibration of power machines. Reference manual*. Leningrad: Mashinostroenie Publ.; 1974. (In Russ.)

3. Il'inskij VS. *Protection of devices from dynamic effects*. Moscow: Jenergiya Publ.; 1970. (In Russ.)

4. Balaji PS, Moussa L, Rahman ME, Ho LH. An analytical study on the static vertical stiffness of wire rope isolators. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2016;30(1):287–295. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-1232-5>

5. Ponomarev JuK., Posohov PV. Development of a mathematical model of a cable shock damper with an

ensemble of elements of a radius-rectilinear configuration. *New materials and technologies in mechanical engineering*. 2013;(18):105–110. (In Russ.) EDN: RZGLZF

6. Ponomarev JuK., Posohov PV., Simakov OB. Development of procedure for calculation of characteristics of cable shock damper with radius and rectilinear sections of centerline. *New materials and technologies in mechanical engineering*. 2014;(20):66–74. (In Russ.) EDN: SXXVXV

7. Kastratović GM, Vidanović ND. Some Aspects of 3D Finite Element Modeling of Independent Wire Rope Core. *FME Transactions*. 2011;39(1):37–40.

8. Gai J, Yan K, Deng Q, Sun M, Ye F. A Finite Element Model for a $6 \times K31WS + FC$ Wire Rope and a Study on Its Mechanical Responses with or without Wire Breakage. *Applied Sciences*. 2023;13(14):8407. <https://doi.org/10.3390/app13148407>

9. Cen B, Lu X, Zhu X. Research of numerical simulation method on vertical stiffness of polycal wire rope isolator. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018;32(6):2541–2549. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0511-3>

10. Pólya G. *Mathematics and plausible reasoning*. Moscow: Nauka Publ.; 1975. (In Russ.)

11. Doronin SV. Linearization of the rigidity of a three-dimensional model of a cable shock damper when analyzing the dynamic behavior of a shock-absorbing system. *Materials of the conference "Ljapunovskie chtenija 2023."* Irkutsk: ISDCT SB RAS; 2023. p. 28–30. (In Russ.)

12. Doronin SV, Reizmund EM, Pokhabov YuP. Computer simulation of vibration tests of absorption system on rope-type vibration isolators. *Automation. Modern technologies*. 2023;77(12):550–555. (In Russ.) <https://doi.org/10.36652/0869-4931-2023-77-12-550-555>

Сведения об авторах

Рейзмунт Елена Михайловна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории вычислительной механики и риск-анализа, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Красноярск, Россия; ORCID: 0000-0003-1631-893X, eLIBRARY SPIN-код: 4397-1569; e-mail: e.sigova@gmail.com

Доронин Сергей Владимирович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вычислительной механики и риск-анализа, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Красноярск, Россия; ORCID: 0000-0002-5256-3871, eLIBRARY SPIN-код: 9816-9080; e-mail: mr.svdoronin@yandex.ru

About the authors

Elena M. Reizmund, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Laboratory of Computational Mechanics and Risk Analysis, Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Krasnoyarsk, Russia; ORCID: 0000-0003-1631-893X, eLIBRARY SPIN-код: 4397-1569; e-mail: e.sigova@gmail.com

Sergey V. Doronin, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of Laboratory of Computational Mechanics and Risk Analysis, Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Krasnoyarsk, Russia; ORCID: 0000-0002-5256-3871, eLIBRARY SPIN-код: 9816-9080; e-mail: mr.svdoronin@yandex.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-4-348-356

UDC 623.746

EDN: EWJUVW

Research article / Научная статья

Methods of a Priori Statistical Analysis of Disturbed Motion of Aircraft in Turbulent Environments

Alexander S. Ermilov[✉], Olga A. Saltykova[✉]

RUDN University, Moscow, Russia

✉ saltykova-oa@rudn.ru

Article history

Received: October 30, 2024

Revised: November 21, 2024

Accepted: November 28, 2024

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution

Undivided co-authorship.

Abstract. The article discusses the methods of a priori statistical analysis used for predicting perturbed motion of aircraft in turbulent environments. Theoretical approaches such as the comparative method and mathematical modeling method are used to analyze the a priori analysis methods. The paper also utilizes statistical methods to evaluate the effectiveness of stochastic models to account for random perturbations caused by turbulence. Special attention is paid to the use of Bayesian analysis, maximum likelihood method and Monte Carlo method applied for probabilistic prediction of the aircraft trajectory. The presented models are illustrated with formulas that describe the dynamics of vehicle motion in turbulent conditions, including equations of motion based on Newton's and Euler's laws. The parameters that determine the dynamics of the perturbed motion of the aircraft in a turbulent environment, such as linear and angular velocities, turbulence intensity, aerodynamic forces, moments of inertia and meteorological conditions, are studied to evaluate the correctness of the calculations. This allows the effects of turbulence on the control and flight trajectory of the aircraft to be taken into account. The results of the study demonstrate the high accuracy of the proposed methods in predicting aircraft motion deviations and emphasize the importance of further development of computational approaches to integrate these methods into real-time control systems, especially for application in conditions of uncertainty and complex external influences. Further research could focus on improving the adaptability of models for different types of aircrafts, taking into account the optimization of computational methods to reduce computational complexity. This will make it possible to improve the efficiency of forecasts in a shorter time and reduce resource costs.

Keywords: a priori analysis, aircraft, stochastic models, turbulent environments, Bayesian analysis, Monte Carlo method, trajectory prediction

For citation

Ermilov AS, Saltykova OA. Methods of a priori statistical analysis of disturbed motion of aircraft in turbulent environments. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(4):348–356. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-348-356>

© Ermilov A.S., Saltykova O.A., 2024



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

Методы априорного статистического анализа возмущенного движения летательных аппаратов в турбулентных средах

А.С. Ермилов[✉], О.А. Салтыкова[✉]

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

✉ saltykova-oa@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 30 октября 2024 г.

Доработана: 21 ноября 2024

Принята к публикации: 28 ноября 2024

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

Аннотация. Рассмотрены методы априорного статистического анализа, используемые для прогнозирования возмущенного движения летательных аппаратов (ЛА) в турбулентных средах. Для анализа методов априорного анализа применяются теоретические подходы, такие как сравнительный метод и метод математического моделирования. Используются статистические методы, позволяющие оценить эффективность стохастических моделей для учета случайных возмущений, вызванных турбулентностью. Особое внимание уделено использованию байесовского анализа, метода максимального правдоподобия и метода Монте-Карло, применяемых для вероятностного прогнозирования траектории движения ЛА. Представленные модели иллюстрированы формулами, которые описывают динамику движения аппарата в турбулентных условиях, включая уравнения движения, основанные на законах Ньютона и Эйлера. Для оценки правильности расчетов изучены параметры, определяющие динамику возмущенного движения ЛА в турбулентной среде, такие как линейные и угловые скорости, интенсивность турбулентности, аэродинамические силы, моменты инерции и метеорологические условия. Это позволяет учитывать влияние турбулентности на управление и траекторию полета ЛА. Результаты исследования демонстрируют высокую точность предложенных методов в прогнозировании отклонений движения ЛА и подчеркивают важность дальнейшего развития вычислительных подходов для интеграции этих методов в системы управления в реальном времени, особенно для применения в условиях неопределенности и сложных внешних воздействий. Дальнейшие исследования могут быть направлены на повышение адаптивности моделей для различных типов ЛА с учетом оптимизации расчетных методов для уменьшения вычислительной сложности. Это позволит повысить эффективность прогнозов в более короткие сроки и снизить затраты ресурсов.

Ключевые слова: априорный анализ, летательные аппараты, стохастические модели, турбулентные среды, байесовский анализ, метод Монте-Карло, прогнозирование траектории

Для цитирования

Ermilov A.S., Saltykova O.A. Methods of a priori statistical analysis of disturbed motion of aircraft in turbulent environments // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 4. С. 348–356. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-348-356>

Introduction

Disturbed motion of aircraft in turbulent environments is one of the key problems of aerodynamics, flight dynamics and control. Turbulent flows arising in the atmosphere significantly complicate the prediction of the aircraft trajectory, causing random disturbances that can lead to a change in its motion and deterioration in controllability. The problem lies not only in modeling such motion, but also in developing analysis methods that allow one to estimate potential deviations of motion from a given trajectory and predict them with a high accuracy.

Understanding turbulent environments is important in the design and operation of aircraft, as it can have a significant impact on flight safety and the efficiency of control systems. To solve this problem, it is important to use methods of a priori statistical analysis, which allows one to make probabilistic forecasts about the behavior of the system before receiving the observed data.

The aim of this work is to study the methods of a priori statistical analysis of the disturbed motion of aircraft in turbulent environments and to assess their applicability for modeling and predicting the behavior of aircraft under uncertainty.

1. Mathematical models of disturbed motion

Technical devices designed to move in the atmosphere or outer space by creating lift or jet propulsion are called aircrafts. They include both manned and unmanned vehicles, such as airplanes, helicopters, airships, rockets, spacecraft, and drones. Depending on the flight environment and operating principle, aircraft can use aerodynamic forces (e.g. airplanes and helicopters) or jet propulsion (e.g. rockets) to maintain flight and maneuver.

Turbulence is a chaotic and unpredictable movement of air flows that occurs in the atmosphere, which has a significant impact on flight dynamics [1]. Turbulent flows are characterized by rapid changes in wind speed and direction at different points in space, which leads to disturbances in the trajectory, stability, and controllability of the aircraft (Figure 1).

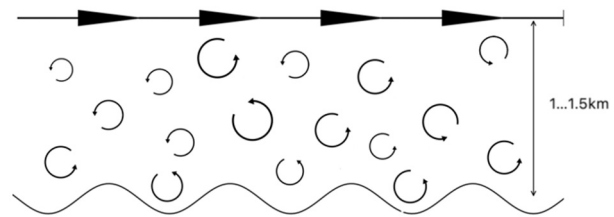


Figure 1. Schematic of dynamic turbulence

Source: made by A.S. Ermilov, O.A. Saltykova

Turbulence near the ground, especially in urban environments and rough terrain, occurs due to the interaction of air flows with various obstacles, such as buildings, trees, and other artificial or natural structures. These objects create zones of disturbed flow, where the air movement becomes chaotic, therefore vortices and sharp changes in wind speed and direction are formed (Figure 2).



Figure 2. Formation of perturbed air flows near the ground

Source: made by A.S. Ermilov, O.A. Saltykova

Under conditions where an aircraft is subject to random disturbances, its trajectory deviates from the calculated one, which requires the development of special methods for describing and predicting such deviations. The dynamics of an aircraft under disturbed conditions is characterized by complex nonlinear processes that require taking into account not only traditional aerodynamic forces and moments, but also random changes in these parameters under the influence of the environment [2].

To describe the motion of an aircraft under turbulent flow conditions, mathematical models are used that include both deterministic and stochastic components. The main parameters that determine the motion are linear and angular velocities, the position of the center of mass, orientation angles (roll, pitch, yaw) and the forces acting on the apparatus.

The classical model of aircraft flight dynamics includes two types of equations: equations describing translational motion (based on Newton's law) and equations describing rotational motion (based on Euler's equations).

Translational motion is described by Newton's second law in vector form:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F}, \quad (1)$$

where m — mass of an aircraft; $\frac{d\vec{V}}{dt}$ — acceleration vector representing the derivative of the velocity vector $\vec{V}$ with respect to time; $\vec{F}$ — the resulting force acting on the aircraft (including aerodynamic force, gravity and thrust).

The rotational motion of the aircraft is described by Euler's equations, which relate the moment of force to angular accelerations:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}, \quad (2)$$

where $\vec{L}$ — angular momentum of the aircraft relative to the center of mass; $\frac{d\vec{L}}{dt}$ — the derivative of angular momentum with respect to time, describing the angular acceleration; $\vec{M}$ — resultant moment of forces acting on the aircraft.

Together, these equations define a complete dynamic model of aircraft motion that takes into account both its translational and rotational motion. However, in a turbulent environment, these algorithms must be modified by adding stochastic per-

turbations to parameters such as drag force, lift force, and moments of inertia [3].

Models of motion in a turbulent environment can be divided into two types: deterministic and stochastic.

Deterministic models describe motion based on known initial conditions and environmental parameters [4]. It is assumed that all external influences on the aircraft, including turbulent flows, are known and can be accurately described, which is unlikely in real conditions.

Stochastic models, such as random process or Gaussian disturbance models, allow the uncertainty associated with the effects of turbulent flows to be taken into account. For example, the von Kármán wind turbulence model and the Iver model are widely used to describe the structure of turbulent flows in the atmosphere [5]. They allow the statistical characteristics of turbulence, such as the intensity and spectrum of disturbances, to be calculated, which is the basis for predicting the effects of turbulence on aircraft motion.

When modeling the disturbed motion of an aircraft in turbulent environments, it is important to take into account many parameters that can affect the trajectory and dynamics of the flight. They characterize both external factors, such as atmospheric turbulence and meteorological conditions, and the internal properties of the aircraft itself, including its aerodynamic characteristics and mass. Correctly taking these parameters into account allows us to create more accurate mathematical models that predict the behavior of the apparatus in complex conditions (Table).

Parameters determining the dynamics of perturbed motion of an aircraft in a turbulent environment

Parameter	Description	Impact on Flight Dynamics
Linear velocities	Velocities along the X, Y, Z axes, affected by external forces.	Determine the flight trajectory and rate of position change.
Angular velocities	Rotational speeds around the X, Y, Z axes.	Influence the orientation and stability of the aircraft.
Turbulence intensity	Amplitude and frequency of air mass disturbances, determining the force acting on the aircraft.	Lead to deviations in trajectory and orientation.
Aerodynamic forces	Lift and drag, dependent on the angle of attack.	Affect lift and drag, influencing altitude and flight speed.
Moments of inertia	Resistance to changes in angular velocities.	Influence rotational stability.
Mass of the aircraft	Affects inertia and susceptibility to external disturbances.	Greater mass reduces trajectory deviation but increases inertia.
Thrust forces	Engine forces, varying under external influences.	Affect speed and trajectory.
Meteorological conditions	Pressure, temperature and air density.	Affect aerodynamics and controllability.

Source: made by A.S. Ermilov, O.A. Saltykova, data from [6; 7].

Mathematical models of disturbed aircraft motion are a combination of deterministic equations of motion and stochastic models of turbulent effects. This allows one to describe both short-term changes in the aircraft trajectory under the influence of random disturbances and long-term changes in the stability and controllability of the device. To improve the accuracy of mathematical models, it is necessary to use a priori statistical analysis.

2. Basic approaches to a priori analysis

A priori analysis is a statistical method that is based on the use of previously known data or assumptions to construct mathematical models and forecasts. In the context of aircraft dynamics in a turbulent environment, a priori analysis allows for uncertainties in motion parameters and external influences, such as turbulent flows, to be taken into account long before direct measurements or experiments are carried out. This approach makes it possible to predict the behavior of a system in conditions where precise data have not yet been obtained, but there is enough information to form reasonable hypotheses.

There are several main approaches to a priori analysis that are used to estimate the disturbed motion of an aircraft. One of the most well-known methods is the Bayesian approach (application of Bayes' theorem) to update a priori assumptions based on the data obtained:

$$P(\theta|D) = \frac{P(D|\theta)P(\theta)}{P(D)}, \quad (3)$$

where $P(\theta|D)$ — posterior probability of a parameter θ after receiving the data D ; $P(D|\theta)$ — likelihood function describing the probability of observing data D at a given parameter value θ ; $P(\theta)$ — prior probability of the parameter θ before receiving data; $P(D)$ — normalizing constant called the total probability of the data.

In the context of turbulence and disturbance modeling, θ may represent parameters describing turbulent flows, such as intensity, frequency of disturbances, or other physical characteristics of

the medium [8]. Prior distribution $P(\theta)$ can be given on the basis of previous experiments, numerical simulations or theoretical estimates. The likelihood function $P(D|\theta)$ reflects the probability of observing real data D (e.g. wind speed measurements or aircraft trajectories) given known values of the turbulence parameters. After updating the prior distribution with data, a posterior distribution $P(\theta|D)$ is obtained, which provides a more accurate estimate of the turbulence and disturbance parameters. This process can be repeated as more data becomes available, gradually refining the model and making the forecasts more accurate.

The Bayesian approach allows one to take into account the initial uncertainty regarding the parameters of the disturbed motion and to correct them based on incoming information, which is especially important in conditions of complex and uncertain external influences, such as turbulent flows.

Maximum Likelihood Estimation (MLE) is used to estimate model parameters based on known data and prior assumptions [9]. In this method, the task is to find parameters θ that maximize the likelihood of the data D , that is, maximize the probability that the observation data could have been obtained with the given parameter values. This is expressed through the **likelihood function**:

$$L(\theta) = P(D|\theta). \quad (4)$$

In turbulent conditions, the maximum likelihood method is used to estimate the parameters of the disturbance model, such as the intensity and frequency of turbulent flows. For example, if the observational data D describe the deviations of the aircraft trajectory in turbulent conditions, then θ can represent the parameters of the turbulent effects, such as the mean velocity and variance of the disturbances.

Another effective tool for a priori analysis is the *Monte Carlo method*, especially in the case of complex stochastic systems [10]. In modeling the disturbed motion of an aircraft, it allows for statistical analysis of various flight trajectories in a turbulent environment, assessing the probability of various deviations from the calculated trajectories (Figure 3).

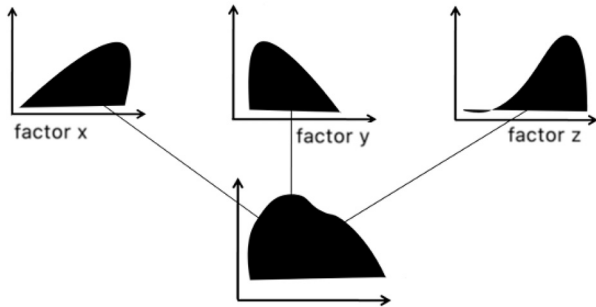


Figure 3. Scheme of the Monte Carlo method
Source: made by A.S. Ermilov, O.A. Saltykova

The factors x , y and z represent various external parameters such as wind speed, direction of turbulent flows and other disturbing forces. Probability distributions are modeled for each of these factors, which are then used to estimate the deviation of the aircraft from the calculated trajectory. The points on the graphs represent a set of possible outcomes obtained using the Monte Carlo method, which allows us to estimate the influence of each factor on the resulting motion of the apparatus.

Regularization is used to solve ill-conditioned problems when there is an excessive amount of a priori data or there is high uncertainty in the initial parameters (Figure 4).

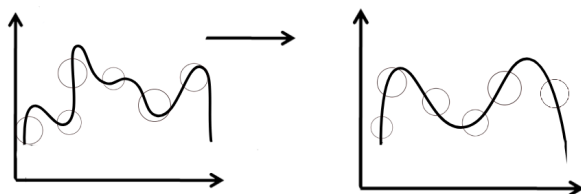


Figure 4. Regularization scheme
Source: made by A.S. Ermilov, O.A. Saltykova

In aircraft control, regularization methods play an important role when working with data obtained in real time from sensors, for example, about the position and speed of the aircraft. In conditions of turbulence or other external influences, the readings may contain significant noise, which complicates the calculation of correct control actions [11]. Regularization helps to smooth

out such fluctuations, making the data more reliable for decision-making [12].

In some cases, a priori analysis can be based on *deterministic approaches*, when the a priori values of the parameters are assumed to be known and unchanged [13]. These methods make it possible to significantly simplify calculations, but their use is justified only under conditions of a low degree of uncertainty. For example, deterministic a priori methods can be useful for analyzing aircraft motion in weak turbulence or in conditions when the nature of the disturbances is well understood [14].

3. Application of a priori models and approaches to the analysis of aircraft dynamics

One example of the application of a priori models is the analysis of the motion of unmanned aerial vehicles (UAVs) in turbulent flows at low altitudes [15]. Turbulence near the earth's surface can be intense and unpredictable, which complicates control and trajectory prediction. In such situations, a priori probability models are used to describe the parameters of turbulent flows (for example, the average value of wind speed and its dispersion). These models allow calculating deviations from the calculated trajectory and assessing the probability of significant disturbances. The main equations describing the dynamics of aircraft motion include Newton's equations for translational motion:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F}_{\text{aэп}} + \vec{F}_{\text{турб}} + \vec{F}_{\text{грав}}, \quad (5)$$

where m — mass of the device; $\vec{V}$ — velocity vector; $\vec{F}_{\text{aэп}}$ — aerodynamic forces; $\vec{F}_{\text{турб}}$ — disturbances caused by turbulent flows; $\vec{F}_{\text{грав}}$ — gravity.

After applying Newton's equations to analyze the aircraft dynamics in turbulent conditions, the influence of turbulent disturbances on the trajectory of motion can be assessed. Value $\vec{F}_{\text{турб}}$, which is a random force caused by turbulence, can fluctuate depending on the characteristics of the

atmosphere and the flight altitude. This leads to the aircraft trajectory deviating from the calculated ones, causing additional maneuvers to stabilize the flight. Using a priori models, it is possible to predict the most probable deviations and adjust the control systems in advance to minimize the effects of turbulence. This approach improves the stability of the aircraft and prevents abrupt changes in trajectory, which is especially important for unmanned systems or when flying at low altitudes, where turbulence is more pronounced.

One of the effective methods of a priori analysis in aircraft control is the *Bayesian approach*, which allows dynamically updating turbulence forecasts as new data arrives. This method is actively used in high-altitude flight conditions, where turbulence can suddenly occur and have a significant impact on the trajectory.

At cruising altitude (usually above 10 km), where aircrafts often encounter turbulence, control is performed using a priori data on the probability of occurrence of turbulent zones [16]. Initially, the control system has a priori information on turbulence obtained from meteorological models, and it is specified as a priori probability of the parameter θ — the turbulence intensity.

When sensors on board detect changes in air flows, the system updates the prior based on these observations using Bayes' theorem:

$$P(\theta|D) = \frac{P(D|\theta)P(\theta)}{P(D)}, \quad (6)$$

where $P(\theta|D)$ — updated posterior probability of turbulence after data acquisition D ; $P(D|\theta)$ — likelihood of observed data.

The aircraft's control system, based on updated a posteriori data, can predict increased turbulence and adjust flight parameters in advance [17].

For example, if the data indicates an increased probability of severe turbulence ahead, the system can reduce speed or adjust altitude to mitigate the impact. This process ensures safe and stable flight, even under unexpectedly changing external conditions.

Conclusion

Methods of a priori statistical analysis of disturbed aircraft motion in turbulent environments demonstrate high efficiency in predicting trajectory deviations and flight dynamics. Stochastic models, such as the Bayesian approach, maximum likelihood method, and Monte Carlo method, allow for uncertainty and random disturbances characteristic of turbulent flows. These approaches make it possible to estimate the probability of motion deviations and improve the accuracy of forecasts under conditions of limited information. The use of a priori data and probabilistic models contributes to improving the stability and controllability of aircraft, especially when they operate in complex external conditions. However, despite significant progress, there remain challenges associated with the integration of such models into real aircraft control systems in real time. In the future, it will be necessary to improve computational methods for prompt processing of large volumes of data and adaptation of models to changing flight conditions. In addition, the development of universal approaches remains to be an important task, that will take into account the specifics of different types of aircraft and the ranges of turbulence they encounter.

References

1. Rassadin AA, Ryakhovsky AV. Modeling turbulent flow: a case study of wing profile streamlining. *Advances in Cybernetics*. 2024;5(2):64–74. (In Russ). <https://doi.org/10.12345/jcyb.ru/issue5/64-74>
2. Kurnyshev DA, Mitin TA, Nyrkov DD. The problem of the stability of the disturbed and undisturbed motion of the aircraft. *Modern Scientific Research: Current Issues, Achievements, and Innovations. Collection of articles of the XXXIV International Scientific and Practical Conference. Penza, August 15, 2023*. 2023:22–27. (In Russ.) EDN: XRTCHK
3. Raol JR, Singh J. *Flight mechanics modeling and analysis*. CRC Press; 2023.
4. Kozhevnikov YuV, Shibanov GP. Optimum average of high-speed to describe of aircraft by the flying-tests. *Mechatronics, Automation, Control*. 2023;24(9):489–495. (In Russ). <https://doi.org/10.31857/S0234-202310050>
5. Sirois J, Desjardins S, Peter G. Vortex-breakdown efficiency of planar regular grid structures — towards the development of design guidelines. *Fluids*. 2024;9(2):43. <https://doi.org/10.3390/fluids9020043>

6. Kreerenko SS, Kreerenko OD. Parametric identification of aerodynamic characteristics of a transport category aircraft using recurrent semi-empirical neural networks in the tensorflow environment. *Mathematical modeling and computational methods*. 2024;43(3):81–99. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/2309-3684-2024-3-8199>

7. Astakhov SA, Ivanov VP, Sergeev IA. Aerodynamic interaction simulation during track testing of aircraft products. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2023; (72):5–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2023.72.01>

8. Kong Y, Mahadevan S. Identifying Anomalous Behavior in Aircraft Landing Trajectory Using a Bayesian Autoencoder. *J Aerosp Inf Syst*. 2024;21(1):19–27. <https://doi.org/10.2514/1.J062834>

9. Bayat S, Amiri R. Advances in UAV-Assisted Localization: Joint Source and UAV Parameter Estimation. *IEEE Trans Veh Technol*. 2023;72(11):14268–78. <https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3190744>

10. Fedulov VA, Bykov NV, Baskakov VD. Estimating of the effectiveness of the weapon system against of small unmanned aerial vehicles by computer simulation. *Systems of Control, Communication and Security*. 2023; (4):63–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2410-9916-2023-4-63-104>

11. An Z, Wang Y, Zhang Q. Learning spatial regularization correlation filters with the Hilbert-Schmidt independence criterion in RKHS for UAV tracking. *IEEE Trans Instrum Meas*. 2023;72:1–12. <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3256114>

12. Israfilov A. Contemporary challenges in cybersecurity of unmanned aerial systems. *Universum: Technical Sciences*. 2024;119(2):19–21. (In Russ.) EDN: SOIKHN

13. Soldatov AS, Soldatov ES, Bogomolov AV. Technological platform for digital twin synthesis of an aircraft based on cyber-physical systems technology. *Large-Scale Systems Management (MLSD '2023): Proceedings of the Sixteenth Conference*. Moscow, September 26–28, 2023, 2023:1092–1099. (In Russ.) <https://doi.org/10.25728/mlsd.2023.1092>

14. Qiao W, Wu S. The Modeling and Simulation of Turbulence for Civil Aircraft Compliance Verification Test. *J Phys Conf Ser: IOP Publishing*. 2023;2658(1):012056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2658/1/012056>

15. Mohamed A, Cai W, Zhang R. Gusts encountered by flying vehicles in proximity to buildings. *Drones*. 2023; 7(1):22. <https://doi.org/10.3390/drones7010022>

16. Yoshimura R, Ishikawa S, Tanaka T, Nakamura Y. Clear air turbulence resolved by numerical weather prediction model validated by onboard and virtual flight data. *Geophys Res Lett*. 2023; 50(12):e2022GL101286. <https://doi.org/10.1029/2022GL101286>

17. Jiang W, Gao L, Zhang X. An Investigation of Sudden Plunging Motion Mechanisms for Transport

Aircraft during Severe Clear-Air Turbulence Encounter. *J Aerosp Eng*. 2023;36(3):04023011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0001533](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001533)

Список литературы

1. Рассадин А.А., Ряховский А.В. Моделирование турбулентного течения на примере задачи об обтекании профиля крыла // Успехи кибернетики. 2024. Т. 5. № 2. С. 64–74. <https://doi.org/10.12345/jcyb.ru/issue5/64-74>

2. Курнышев Д.А., Митин Т.А., Нырков Д.Д. Задача об устойчивости возмущенного и невозмущенного движения ЛА // Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей XXXIV Международной научно-практической конференции. Пенза, 15 августа 2023 года. 2023. С. 22–27. EDN: XRTCHK

3. Raol J.R., Singh J. Flight mechanics modeling and analysis. CRC Press, 2023.

4. Кожевников Ю.В., Шибанов Г.П. Оптимальное осреднение высотно-скоростных характеристик летательных аппаратов при их летных испытаниях // Мехатроника, автоматизация, управление. 2023. Т. 24. № 9. С. 489–495. <https://doi.org/10.31857/S0234-202310050>

5. Sirois J., Desjardins S., Peter G. Vortex-breakdown efficiency of planar regular grid structures — towards the development of design guidelines // *Fluids*. 2024. Vol. 9. No. 2. P. 43. <https://doi.org/10.3390/fluids9020043>

6. Крееренко С.С., Крееренко О.Д. Моделирование и параметрическая идентификация аэродинамических характеристик самолета транспортной категории с использованием нейросетей в среде Tensorflow // Математическое моделирование и численные методы. 2024. № 3 (43). С. 81–99. <https://doi.org/10.18698/2309-3684-2024-3-8199>

7. Астахов С.А., Иванов В.П., Сергеев И.А. Моделирование аэродинамического взаимодействия при трековых испытаниях изделий авиационной техники // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2023. № 72. С. 5–20. <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2023.72.01>

8. Kong Y, Mahadevan S. Identifying Anomalous Behavior in Aircraft Landing Trajectory Using a Bayesian Autoencoder // *Journal of Aerospace Information Systems*. 2024. Vol. 21. No. 1. P. 19–27. <https://doi.org/10.2514/1.J062834>

9. Bayat S, Amiri R. Advances in UAV-Assisted Localization: Joint Source and UAV Parameter Estimation // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2023. Vol. 72. No. 11. P. 14268–14278. <https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3190744>

10. Федулов В.А., Быков Н.В., Баскаков В.Д. Оценка эффективности системы поражения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов методом имита-

ционного моделирования // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 4. С. 63–104. <https://doi.org/10.24412/2410-9916-2023-4-63-104>

11. An Z., Wang Y., Zhang Q. Learning spatial regularization correlation filters with the hilbert-schmidt independence criterion in RKHS for UAV tracking // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2023. Vol. 72. P. 1–12. <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3256114>

12. Исрафилов А. Современные вызовы в области кибербезопасности беспилотных авиационных систем // Universum: технические науки. 2024. № 2–1 (119). С. 19–21. EDN: SOIKHN

13. Солдатов А.С., Солдатов Е.С., Богомолов А.В. Технологическая платформа синтеза цифрового двойника летательного аппарата на основе технологий киберфизических систем // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023) : труды Шестнадцатой международной конференции. Москва, 26–28 сентября 2023 года. 2023. С. 1092–1099. <https://doi.org/10.25728/mlsd.2023.1092>

14. Qiao W., Wu S. The Modeling and Simulation of Turbulence for Civil Aircraft Compliance Verification Test // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2023. Vol. 2658. No. 1. P. 012056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2658/1/012056>

15. Mohamed A., Cai W., Zhang R. Gusts encountered by flying vehicles in proximity to buildings // Drones. 2023. Vol. 7. No. 1. P. 22. <https://doi.org/10.3390/drones7010022>

16. Yoshimura R., Ishikawa S., Tanaka T., Nakamura Y. Clear air turbulence resolved by numerical weather prediction model validated by onboard and virtual flight data // Geophysical Research Letters. 2023. Vol. 50. No. 12. Article no. e2022GL101286. <https://doi.org/10.1029/2022GL101286>

17. Jiang W., Gao L., Zhang X. An Investigation of Sudden Plunging Motion Mechanisms for Transport Aircraft during Severe Clear-Air Turbulence Encounter // Journal of Aerospace Engineering. 2023. Vol. 36. No. 3. Article no. 04023011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0001533](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001533)

Сведения об авторах

Ермилов Александр Сергеевич, аспирант кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; ORCID: 0009-0007-4549-172X; e-mail: eemilov-sasha@yandex.ru

Салтыкова Ольга Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; ORCID: 0000-0002-3880-6662, eLIBRARY SPIN-код: 3969-6707; e-mail: saltykova-oa@rudn.ru

About the authors

Alexander S. Ermilov, Postgraduate student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; ORCID: 0009-0007-4549-172X; e-mail: eemilov-sasha@yandex.ru

Olga A. Saltykova, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; ORCID: 0000-0002-3880-6662, eLIBRARY SPIN-code: 3969-6707; e-mail: saltykova-oa@rudn.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-4-357-367

УДК 004.94

EDN: EYCBZW

Научная статья / Research article

Экспертная система поддержки принятия решений в области строительства

А.А. Меркулов^{ID}

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

✉ amerkulov@levelgroup.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 15 сентября 2024 г.

Доработана: 10 ноября 2024 г.

Принята к публикации: 17 ноября 2024 г.

Заявление о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии
конфликта интересов.

Аннотация. Разработаны методы построения многопрофильной экспертной системы поддержки принятия решений в области строительства. Положенное в основу исследования архитектурное решение выстроено на теории нечетких множеств. Рассмотрены программные подходы к проектированию специализированных экспертных систем, а также задачи, решаемые системой поддержки принятия решений на этапе подготовки объекта к строительству. Цель исследования — разработка архитектуры экспертной системы, состоящей из систем логического вывода и набора взаимосвязанных нечетких экспертных модулей базы знаний. Задача исследования — разработка обобщенного алгоритма функционирования экспертной системы, архитектуры базы знаний и прототипа программной реализации экспертной системы. В результате проведенного исследования разработаны два программных продукта на языке Python и прототип на языке Matlab. Приведены примеры интерфейсов и программного кода разработанной экспертной системы поддержки принятия решений в области строительства.

Ключевые слова: многомодульная архитектура, интеллектуальные информационные системы, нечеткая логика

Для цитирования

Меркулов А.А. Экспертная система поддержки принятия решений в области строительства // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 4. С. 357–367. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-357-367>



Expert Decision Support System in the Field of Construction

Alexander A. Merkulov 

RUDN University, Moscow, Russia

✉ amerkulov@levelgroup.ru

Article history

Received: September 15, 2024

Revised: November 10, 2024

Accepted: November 17, 2024

Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Abstract. Methods of building a multidisciplinary expert decision support system in the field of construction have been developed. The architectural solution underlying the study is based on the theory of fuzzy sets. Software approaches to the design of specialized expert systems are considered, as well as the tasks solved by the decision support system at the stage of preparing an object for construction. The purpose of the study is to develop the architecture of an expert system consisting of logical inference systems and a set of interconnected fuzzy expert modules of the knowledge base. The objective of the research is to develop a generalized algorithm for the functioning of the expert system, the architecture of the knowledge base and a prototype of the software implementation of the expert system. As a result of the research, two software products have been developed in Python and a prototype in Matlab. Examples of interfaces and program code of the developed expert decision support system in the field of construction are given.

Keywords: multi-module architecture, intelligent information systems, fuzzy logic

For citation

Merkulov AA. Expert decision support system in the field of construction. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(4):357–367. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-357-367>

Введение

Строительная отрасль в России интенсивно развивается: внедряются новые методы как самого строительства, так и проектирования в нем различных систем, включая расчетные системы интеграции различных коммуникаций, аналитические системы выбора и обоснования инженерных решений. Актуальными становятся вопросы организации умных городов, оптимизации систем электроснабжения в многоквартирных домах, поддержки принятия решений для управления рисками, инвестиций в строительство и др. [1–6]. Поскольку объем новых знаний в строительной области стремительно увеличивается, встает задача их формализации, с тем, чтобы тиражировать и применять эти знания там, где не хватает специалистов (экспертов) в соответствующих областях (как правило, в узкопрофильных, специализированных обла-

стях строительства). В разработке таких экспертных систем (ЭС) заинтересованы крупные подрядные и строительные организации, а также организации и органы государственной власти, которые занимаются проектированием многоквартирных жилых домов и планированием городских застроек.

Порой из-за инженерных ошибок в строительной области построенный многоквартирный дом сдается с неверными техническими характеристиками и впоследствии признается подлежащим сносу. Это негативно сказывается на имидже строительных компаний и интересах инвесторов. Очевидно, что большинство ошибок происходит на этапе проектирования, в связи с чем представляется актуальным решить задачу эффективного хранения и передачи экспертных знаний в строительной области. Это позволит стабильно, с минимальным риском развивать и внедрять инженерно-технические решения [7].

Для выполнения поставленной задачи целесообразно применять методы машинного обучения и системы искусственного интеллекта, получившие в последние годы мощное развитие и широкое распространение. Следует отметить, что существенным ограничением для использования систем машинного обучения является обязательное наличие репрезентативной обучающей выборки. В то же время существуют экспертные системы, функционирующие на основе экспертных знаний. Именно их стоит использовать для создания программных продуктов и систем поддержки принятия решений для широкого круга инженерно-строительных задач.

1. Разработка архитектуры экспертной системы поддержки принятия инженерных решений в области строительства

В соответствии с результатами теоретических и прикладных научных исследований [8] архитектура экспертной системы включает следующие элементы:

- модуль приобретения знаний;
- базу знаний (правила логического вывода);
- систему логического вывода;
- интерфейс взаимодействия с пользователем;
- модуль объяснения результатов.

Согласно изученным теоретическим трудам [9–13] построение экспертной системы является итерационной процедурой, в которой когнитолог (инженер по знаниям), взаимодействуя с экспертами, итеративно пополняет базу знаний (БЗ), поддерживая экспертную систему в актуальном состоянии. Этот процесс реализуется методами инженерии знаний, в соответствии с которыми процесс создания экспертной системы начинается с установки предъявляемых к ней требований; анализа данных, полученных из открытых источников; сбора имеющихся знаний для определения необходимых характеристик объектов, задач, типов пользователей и пр.

Одна из задач когнитолога — формализация знаний в той или иной модели их представ-

ления (продукционной, фреймовой, логической и др.) с последующей постановкой задачи программистам. Таким образом, в процессе построения экспертной системы он взаимодействует с программистами, экспертами и другими источниками знаний для сбора информации и формирования базы знаний.

Затем следует разработка базы знаний, включающая определение типа входных данных (например, текстовые документы и стандарты); возможных значений и взаимосвязи между переменными; методов представления знаний и логического вывода. Использование математического аппарата нечеткой логики при создании экспертных систем позволяет учитывать нелинейную зависимость между переменными и опираться на стохастические модели принятия решений, что способствует снижению вероятности ошибок. Обобщенная структурно-функциональная схема экспертной системы схематически представлена на рис. 1.

Экспертная система состоит из следующих функциональных элементов:

- базы знаний (на основе нечеткой логики);
- блока приобретения знаний;
- системы логического вывода;
- пользовательского интерфейса.

Система логического вывода обладает интерпретатором, что отличает ЭС от нейронных сетей. Посредством интерфейса пользователь получает доступ к знаниям и может интерпретировать полученные ответы экспертной системы в соответствии с БЗ и правилами логического вывода. База знаний ЭС связана с определенной проблемной областью строительства. Система логического вывода обеспечивает экспертную оценку и расчет численных характеристик строительных объектов. Такая система представляет собой программно-аппаратное ядро интеллектуальной информационной системы. В настоящей работе рассмотрен логический формат обработки информации, при этом по рассчитанным параметрам можно визуализировать пространственную модель посадки зданий.

Для организации работы экспертной системы был разработан алгоритм, представленный на рис. 2.

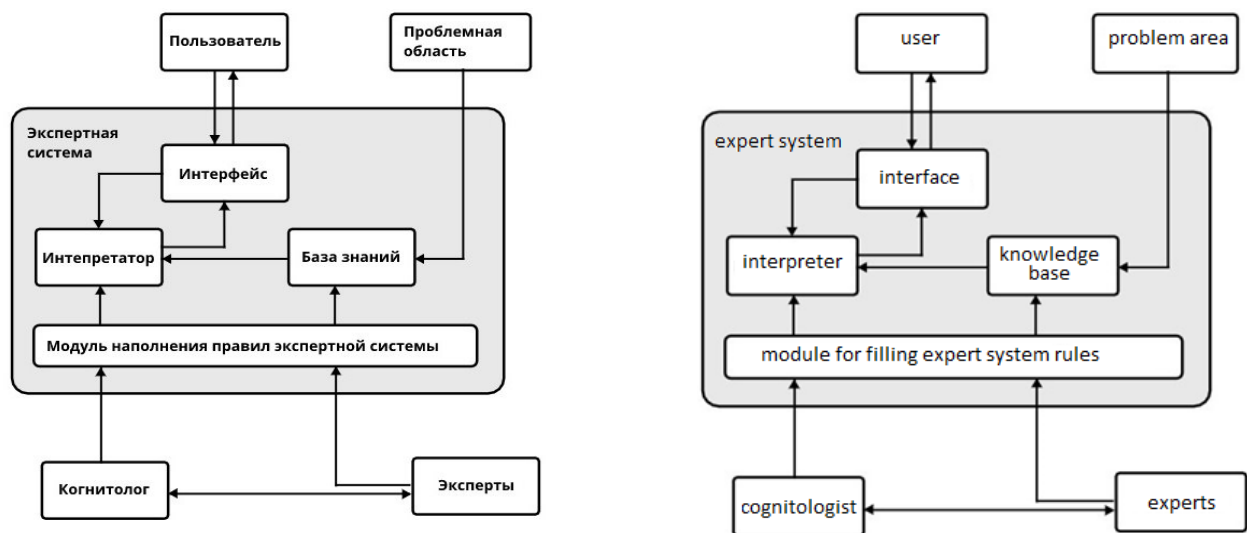


Рис. 1. Обобщенная структурно-функциональная схема экспертной системы
И с т о ч н и к: выполнено А.А. Меркуловым

Figure 1. Generalized structural and functional scheme of the expert system
S o u r c e: made by A.A. Merkulov

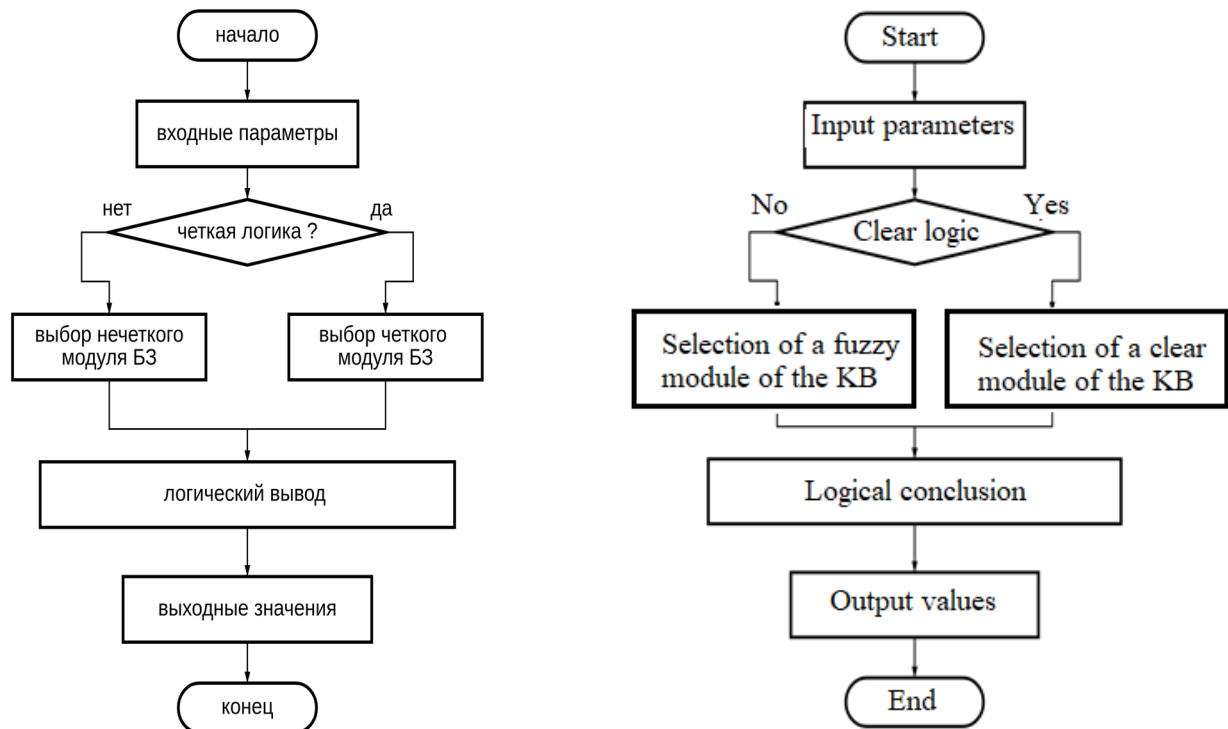


Рис. 2. Алгоритм функционирования экспертной системы поддержки
принятия инженерных решений в области строительства
И с т о ч н и к: выполнено А.А. Меркуловым

Figure 2. The algorithm of functioning of the expert system for support
of engineering decision-making in the field of construction
S o u r c e: made by A.A. Merkulov

Данный алгоритм не содержит циклов, так как все входные значения преобразуются в выходные посредством системы логических правил, содержащейся в базе знаний. В соответствии с разработанным алгоритмом по входным параметрам ЭС определяется вид логического вывода: четкий, нечеткий или комбинированный. Наличие модуля четкой логики обусловлено необходимостью учета строго регламентированных правил и ГОСТов (в частности касающихся отступов зданий от соседних строений, линий связи и коммуникации, деревьев), а также других регламентированных параметров и нормативов. При этом одни и те же входные параметры могут соответствовать сразу нескольким модулям как в четкой, так и в нечеткой логике.

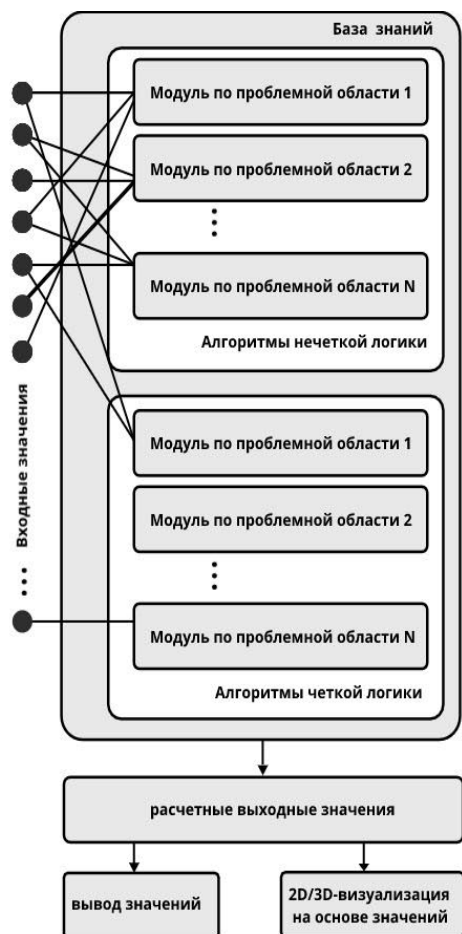


Рис. 3. Многомодульная архитектура базы знаний экспертной системы поддержки принятия решений
Источник: выполнено А.А. Меркуловым

Разработанная архитектура подразумевает, что часть входных переменных относится только к соответствующим модулям, а часть может применяться более чем в одном модуле. После того как по входам определены модули логического вывода, на выход системы подаются выходные значения, доступные пользователю через интерфейс ЭС. Обобщенная архитектура логического ядра экспертной системы поддержки принятия решений в области строительства схематически изображена на рис. 3. Она состоит из ряда подсистем, каждая из которых реализована на основе методов инженерии знаний и нечеткой логики. В разработанном прототипе ЭС используются разреженные связи между входными параметрами и соответствующими им модулями.

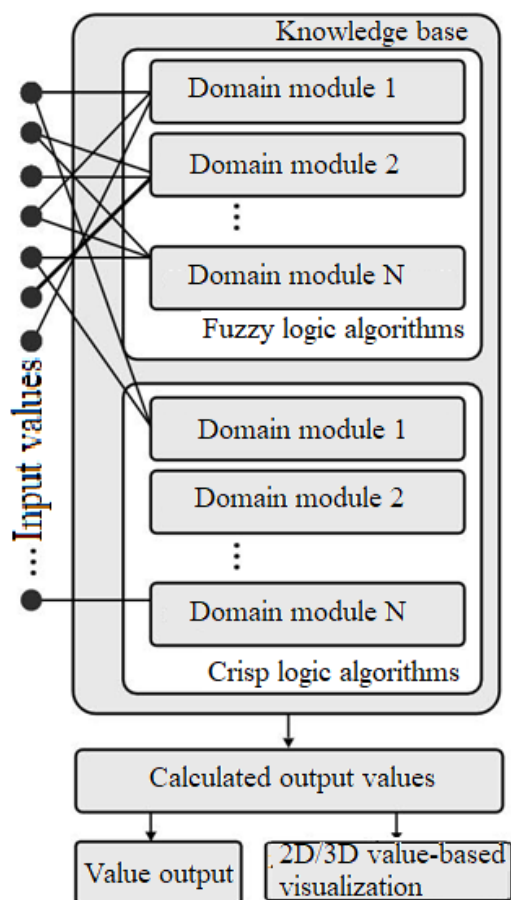


Figure 3. The multi-module architecture of the knowledge base of the expert decision support system
Source: made by A.A. Merkulov

Разработанная база знаний состоит из следующих экспертно-аналитических модулей:

- ЭС расчета параметров лифтового оборудования;
- ЭС расчета ориентации здания по сторонам света в зависимости от параметров инсоляции;
- четырех ЭС расчета количества этажей в разных условиях городской застройки;
- ЭС оценки технического состояния зданий и сооружений;
- ЭС оценки инвестиционной привлекательности строительных объектов;
- ЭС оценки инвестиционных проектов;
- ЭС расчета инвестиционных рисков.

По мере развития разработанной архитектуры экспертной системы возможно применение математического аппарата нечеткой логики для анализа выходных значений с последующим их использованием в качестве входных переменных других подсистем. Это полезно для выработки более точных рекомендаций по посадке зданий или другим техническим инженерным решениям. В таком случае ЭС будет иметь каскадную иерархическую структуру базы знаний.

2. Разработка программной реализации экспертной системы поддержки принятия решений в области строительства

Прототип каждого расчетного модуля экспертной системы был выполнен на языке Matlab в пакете FuzzyLogic Toolbox, который позволяет определить входные и выходные переменные, их функции принадлежности и правила логического вывода.

Для внедрения в практику разработанных экспертных систем использован язык программирования Python (библиотеки PyLab, Numpy, PySimpleGUI и Skfuzzy), на котором помимо баз знаний разработан графический пользовательский интерфейс. Данная программная реализация не зависит от сторонних разработчиков и может запускаться в различных операционных системах.

Все разработанные базы знаний хранятся в отдельных python-файлах, начинающихся с префикса **baza_**, которые можно использовать для редактирования правил вывода, лингвистических переменных и их функций принадлежности, а также для создания и отладки новых баз знаний для экспертных систем.

Были разработаны две многопрофильные экспертно-аналитические системы «Посадка» и «Оценка», объединяющие группы экспертных модулей по назначению.

Формат программного задания системы управления базы знаний:

- имя лингвистической переменной с префиксом **_range** задает диапазон изменения и шаг соответствующей переменной;
- идентификаторы **ctrl.Antecedent()** и **ctrl.Consequent()** определяют входные и выходные переменные соответственно;
- конструкция **имя переменной**

['название функции принадлежности'] = fuzz.gaussmf(имя переменной_range, 4, 3)

задает гауссовскую функцию принадлежности для лингвистической переменной с центром в точке 4 и шириной 3. Для треугольных функций принадлежности предусмотрена функция trimf. Таким образом, задаются функции принадлежности для всех переменных (параметры этих функций значительно влияют на работу экспертной системы);

– для просмотра заданных функций следует использовать команду:

имя переменной.view(); pl.show();

– правила вывода имеют вид «если ..., то» и задаются в программе в формате:

ctrl.Rule(переменная1['значение'] & переменная2['значение'],

выходная переменная['значение']), где знак & описывает условие «и» (для условия «или» следует формировать отдельные правила).

После строки «`if __name__ == '__main__':`» следуют методы визуализации двумерных проекций поверхности отклика для отладки экспертной системы. В Приложении приведен фрагмент листинга программного кода базы знаний по расчету количества этажей в строительном объекте.

Для программной реализации прототипа экспертной системы были использованы знания экспертов и информация, полученная из открытых источников. В соответствии с предлагаемой архитектурой разработанная ЭС состоит из набора специализированных модулей. Каждый модуль выполняет свои функции и сконструирован на основе экспертных знаний из соответствующей предметной области. С использованием методов инженерии знаний были выявлены все объекты предметной области и их взаимосвязи. Для этого инженер по знаниям проводил опрос среди экспертов и анализировал тематическую литературу.

Таким образом, благодаря разработанной многомодульной структуре базы знаний, выбранным лингвистическим переменным и их значениям, а также входным и выходным переменным для каждой подсистемы логического вывода были определены переменные, необходимые для создания базы знаний многомодульной экспертной системы.

На одном из этапов разработки были проведены подбор и определение лингвистических переменных и их функций принадлежности. Каждая переменная подвергалась анализу с целью определения диапазона ее значений и формы функций принадлежности, что позволило создать основу для обоснованного логического вывода. Кроме того, были разработаны входные и выходные переменные для каждой подсистемы логического вывода, за счет чего можно удобным и структурированным образом передавать данные между модулями, используя функциональные возможности базы знаний и решая узкоспециализированные задачи в области строительства, которые требуют наличия экспертных знаний.

Следует отметить, что при эквивалентном наборе правил в БЗ разработанная многомодульная архитектура ЭС является более выгодной по сравнению с одномодульной, поскольку в многомодульном подходе каждый модуль имеет индивидуальный алгоритм дефазификации [12]. Многомодульная архитектура БЗ позволяет более точно и гибко подстраивать выходные значения под каждую проблемную область в сфере строительства. Как уже было отмечено ранее, разработанная архитектура экспертной системы может расширяться и дополняться другими модулями. При этом некоторые объекты и правила вывода являются общими для разных модулей. По мере наполнения базы знаний экспертной системы число правил, входных и выходных переменных будет увеличиваться. Комплексный подход позволяет охватить максимальное количество аспектов строительства и масштабировать ЭС для приобретения и тиражирования знаний, необходимых для проектирования многоквартирных жилых домов, с учетом современных и актуальных требований и нормативов.

В результате была создана программная реализация экспертной системы на языке Matlab, а также разработана усовершенствованная платформа «ПрогрессСтройЭксперт» с пользовательским интерфейсом на языке Python. Созданы все необходимые функции и классы для дальнейшего наполнения, отладки и совершенствования прототипа экспертной системы совместно со специалистами-экспертами.

Программа выполнена в виде двух подпрограмм «Посадка» и «Оценка», интерфейс которых фрагментарно изображен на рис. 4, 5. После выбора входных значений в соответствующем модуле следует нажать кнопку «Рассчитать» для получения результатов расчета. На основе рассчитанных числовых значений можно выстроить 3D-модель дома на участке застройки. Также возможно добавление информации о близлежащих газопроводах, стоянках, деревьях и прочих сведений для определения требуемого отступа от границ участка.

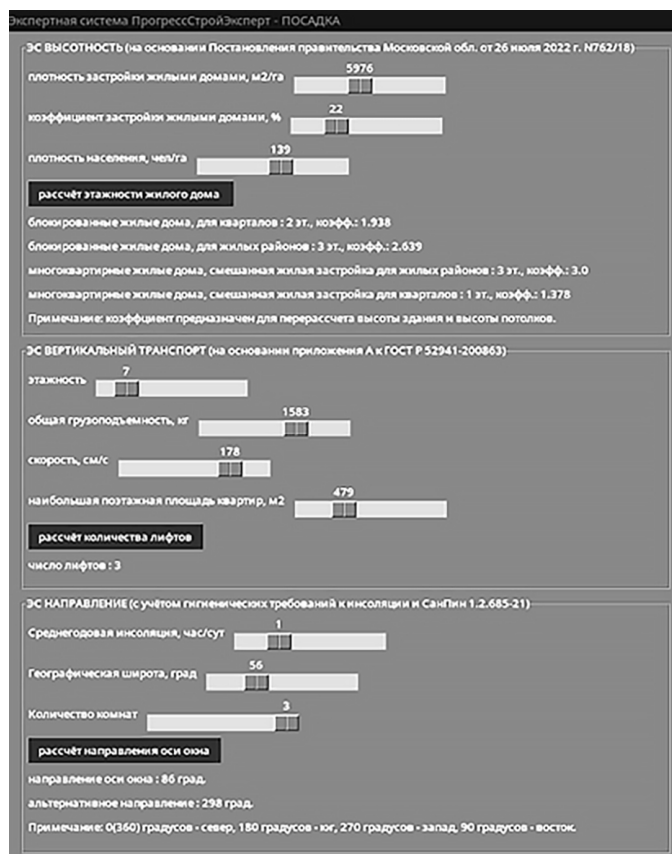


Рис. 4. Интерфейс многомодульной ЭС «Посадка»
Источник: выполнено А.А. Меркуловым

Figure 4. Interface of the multimodule ES “Landing”
Source: made by A.A. Merkulov

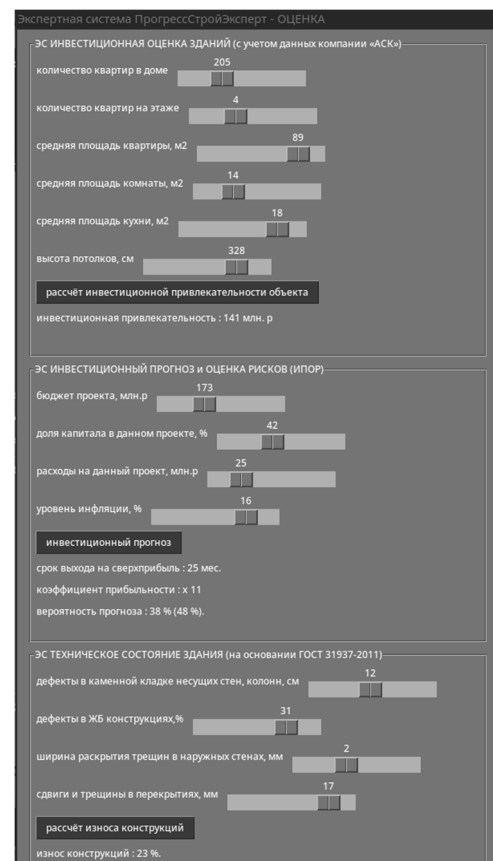


Рис. 5. Интерфейс ЭС «Оценка»

Источник: выполнено А.А. Меркуловым

Figure 5. The interface of the ES “Assessment”
Source: made by A.A. Merkulov

Исследование описывает методологические и программные подходы к проектированию экспертных систем поддержки принятия решений в сфере строительства. Основой служит архитектурное и программное решение, выстроенное на базе теории нечетких множеств [14–18].

Заключение

Рассмотрены подходы к проектированию экспертных систем, которые помогают анализировать данные, давать экспертные рекомендации и принимать решения с использованием доступной информации в условиях неопределенности.

Сделан вывод о том, что применение инструментария нечеткой логики в качестве метода

хранения и обработки знаний при создании экспертных систем для проектирования строительства зданий является эффективным подходом к решению широкого класса задач в этой области.

Рассмотрены программные и архитектурные подходы к проектированию экспертных систем и основные задачи, которые разработанная экспертная система способна решать на этапе подготовки к строительству, что важно для повышения качества, инвестиционной привлекательности и эффективности строительных объектов.

Архитектура разработанной экспертной системы состоит из набора аналитических модулей, которые решают задачи, исходя из различных аспектов предстроительного проектирования. Структура объединенной базы знаний, состоящая из отдельных модулей, каждый из

которых отвечает за определенную проблемную область, позволяет решать задачи в различных областях строительства.

Таким образом, решение, на котором основана экспертная система, учитывает решение широкого класса задач, связанных с подготовкой объекта к строительству, что в целом способствует развитию экспертных систем для использования в строительной отрасли в России.

Приложение. Листинг программного кода

```
import numpy as np
import pylab as pl
import skfuzzy as fuzz
from skfuzzy import control as ctrl
sg_range=np.arange(0, 4, 0.1)
...
sg = ctrl.Antecedent(sg_range, 'sg')
sh = ctrl.Antecedent(sh_range, 'sh')
kt = ctrl.Antecedent(kt_range, 'kt') # Auto-membership
#kz.automf(3, names = ['1', '2','3'])
ins1 = ctrl.Consequent(ins1_range, 'ins1') # Auto-membership
#kz.automf(3, names = ['1', '2','3'])
ins2 = ctrl.Consequent(ins2_range, 'ins2') #
...
sg['1'] = fuzz.gaussmf(sg_range, 0,0.65) # [0.65 0] '0-1':
...
ins1['1'] = fuzz.gaussmf(ins1_range, 105, 10) # '85-135':
'gaussmf',[12.5 105.19]
...
fuzzy_system = ctrl.ControlSystem([
ctrl.Rule(sg['5'] & sh['3'] & kt['1'], ins1['15'] ),
ctrl.Rule(sg['5'] & sh['3'] & kt['2'], ins1['2'] ),
...
])
fuzzy_simulation = ctrl.ControlSystemSimulation(fuzzy_system)
if __name__ == '__main__':
    sg.view()
    sh.view()
    kt.view()
    ins1.view()
    ins2.view()
    pl.show()
    # Set input values
    fuzzy_simulation.input['kz'] = 50
    fuzzy_simulation.input['pz'] = 7000
    fuzzy_simulation.compute()
    out = fuzzy_simulation.output['e']
    print(out)
    outs=[]
    for i in kz_range:
        fuzzy_simulation.input['pz'] = 0
        fuzzy_simulation.input['kz'] = i
        fuzzy_simulation.compute()
        outs.append(fuzzy_simulation.output['e'])
```

Список литературы

1. Сотникова К.Н., Колосова Н.В., Драпалюк Р.А. Моделирование гибридной экспертной системы для проектирования зданий «зеленого строительства» // Инженерные системы и сооружения. 2012. № 2. С. 105–113. EDN: PCGGMN
2. Tur V.V., Yalovaya Y.S. Fuzzy logic — based expert system for assessment of existing concrete structures // Construction of Unique Buildings and Structures. 2019. No. 6 (81). P. 7–17. <http://doi.org/10.18720/CUBS.81.1>
3. Сергиенко М.А. Разработка нечетких экспертных систем с помощью FuzzyCLIPS // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сборник трудов Международной научной конференции. Воронеж, 17–19 декабря 2018 года. Воронеж : Изд-во «Научно-исследовательские публикации», 2019. С. 323–325. EDN: YYJUQH
4. Кашеварова Г.Г., Тонков Ю.Л., Фурсов М.Н. Нечеткая экспертная система диагностики повреждений строительных конструкций // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2014. № 17. С. 167–173. EDN: VXPZWN
5. Сотникова К.Н., Колосова Н.В., Толмачев А.П. Экспертная система принятия решений для реконструкции зданий с учетом принципов «зеленого строительства» // Инженерные системы и сооружения. 2012. № 1. С. 98–105. EDN: OUIBVF
6. Кашеварова Г.Г., Дроздов К.Д. Экспертные системы на базе нечеткой логики в строительстве // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2019. Т. 1. С. 268–273. EDN: VOISNR
7. Чесалин А.Н., Гродзенский С.Я., Ван Ты Ф., Нулов М.Ю., Агафонов А.Н. Технология оценки рисков на этапах жизненного цикла продукции с использованием нечеткой логики // Russian Technological Journal. 2020. Т. 8. № 6. С. 167–183. <http://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-167-183>
8. Энс Е.С. Принятие управленческих решений в бизнес-среде на основе методов нечеткой логики, экспертных систем // Теоретические и прикладные научные исследования : проблемы и пути их решения : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Екатеринбург, 10 октября 2020 г. Екатеринбург : НОО «Профессиональная наука», 2020. С. 35–46. EDN: ASNOCР
9. Савченко Д.В., Резникова К.М., Смышляева А.А. Нечеткая логика и нечеткие информационные технологии // Отходы и ресурсы. 2021. Т. 8. № 1. С. 10. <http://doi.org/10.15862/10ECOR121>
10. Ляпко А.М., Курочкин А.В. Библиотека для создания экспертных систем на базе алгоритмов нечеткого вывода на языке TypeScript. Минск. 2020. 79 с.

11. Тонков Ю.Л. Математические модели для идентификации категории технического состояния строительных конструкций на основе нечеткой логики: Дис. канд. технич. наук. Пермский национальный исследовательский политехнический университет. 2018. 208 с. EDN: EQBLJS

12. Балмаганбетова Ф.Т. Теория нечетких множеств в современной науке // Альманах мировой науки. 2019. № 7. С. 5–6. EDN: KEWNTS

13. Бакаев В.А., Благов А.В. Исследование подходов к построению самообучающихся экспертных систем с нечеткой логикой // Информационные технологии и нанотехнологии: сборник трудов V Международной конференции и молодежной школы. Самара, 21–24 мая 2019 года. Самара : Новая техника, 2019. Т. 4. С. 867–871. EDN: YHKERC

14. Набокин А.А., Матвеев М.Г. Разработка оболочки экспертной системы на основе нечеткой логики // Сборник студенческих научных работ факультета компьютерных наук ВГУ. Воронеж, 2019. С. 139–145. EDN: QMBBSX

15. Храмов В.Ю., Молчанов А.Н., Зинькевич Г.В. Оболочка интегрированной экспертной системы с нечеткой логикой // Энергия–XXI век. 2019. № 4. С. 61–69. EDN: OHKOSX

16. Варламов О. Обзор 18 миварных экспертных систем, созданных на основе MOGAN // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2021. № 3 (101). С. 5–20. <http://doi.org/10.35330/1991-6639-2021-3-101-5-20>

17. Киселева Э.А., Краева А.А., Савинова Ю.С. Обзор нечеткой логики в управлении // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. 2019. № 3. С. 401–405. EDN: WHWWVT

18. Кульмамиров С.А., Рахимбердин Д.Р. Возможности теории нечеткой логики при анализе рисков систем информационной безопасности // Синергия наук. 2020. № 54. С. 817–831. EDN: WTMRZP

References

1. Sotnikova KN, Kolosova NV, Drapalyuk RA. Modeling of a hybrid expert system for the design of “Green building” buildings. *Engineering systems and structures*. 2012;(2):105–113. (In Russ.) EDN: PCGGMN

2. Tur VV, Yalovaya YS. Fuzzy logic — based expert system for assessment of existing concrete structures. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2019 6(81):7–17. <http://doi.org/10.18720/CUBS.81.1>

3. Sergienko MA. Development of fuzzy expert systems using FuzzyCLIPS. *Proceedings of the International Scientific Conference Actual problems of applied mathematics, computer Science and Mechanics*. Voronezh, December 17–19, 2018. Voronezh: Scientific research publications Publ.; P. 323–325. (In Russ.) EDN: YYJUQH

4. Kashevarova GG, Tonkov YuL, Fursov MN. Fuzzy expert system for diagnosing damage to building structures. *Bulletin of the Volga regional branch of the Russian Academy of architecture and building sciences*. 2014(17):167–173. (In Russ.) EDN: VXPZWN

5. Sotnikova KN, Kolosova NV, Tolmachev AP. Expert decision-making system for the reconstruction of buildings taking into account the principles of “Green construction”. *Engineering systems and structures*. 2012;(1):98–105. (In Russ.) EDN: OUIBVF

6. Kashevarova GG, Drozdov KD. Expert systems based on fuzzy logic in construction. *Modern technologies in construction. Theory and practice*. 2019;1:268–273. (In Russ.) EDN: VOISNR

7. Chesalin AN, Grodzensky SYa, Van Ty F, Nilov MYu, Agafonov AN. Technology for risk assessment at product lifecycle stages using fuzzy logic. *Russian Technological Journal*. 2020;8(6):167–183. (In Russ.) <http://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-167-183>

8. Ens ES. Making management decisions in a business environment based on fuzzy logic methods, expert systems. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Theoretical and applied scientific research: problems and solutions*. Yekaterinburg, October 10, 2020. Yekaterinburg: NOO “Professional science”. p. 35–46. (In Russ.) EDN: ASNOCP

9. Savchenko D.V., Reznikova K.M., Smyshlyaeva A.A. Fuzzy logic and fuzzy information technology. *Waste and resources*. 2021;8(1):10. (In Russ.) <http://doi.org/10.15862/10ECOR121>

10. Lyapko AM, Kurochkin AV. *Library for creating expert systems based on fuzzy inference algorithms in TypeScript*. Minsk. 2020. (In Russ.)

11. Tonkov YuL. *Mathematical models for the identification of the category of technical condition of building structures based on fuzzy logic*: Dis. candidate of Technical Sciences. Perm National Research Polytechnic University, 2018. 208 с. (In Russ.) EDN: EQBLJS

12. Balmaganbetova FT. Theory of fuzzy sets in modern science. *Almanac of World Science*. 2019;(7):5–6. (In Russ.) EDN: KEWNTS

13. Bakaev V, Blagov A. The research of approaches to create self-learning expert systems with fuzzy logic. *Proceedings of the V International Conference and Youth School of Information Technology and Nanotechnology*. Samara, May 21–24, 2019. Vol. 4. Samara: Novaya texnika Publ.; 2019. p. 867–871. (In Russ.) EDN: YHKERC

14. Nabokin AA, Matveev MG. Development of an expert system shell based on fuzzy logic // *Proceedings of the student scientific papers of the Faculty of Computer Science at VSU*. Voronezh, 2019. P. 139–145. (In Russ.) EDN: QMBBSX

15. Khramov V.Iu., Molchanov A.N., Zinkevich G.V. The integrated expert system shell with a fuzzy logic. *Energy — the XXI century*. 2019;(4):61–69. (In Russ.) EDN: OHKOSX

16. Varlamov O.O. Overview of 18 mivar expert systems created on mogan base. *News of the Kabardino-Balkarian scientific center of RAS*. 2021;3(101):5–20. (In Russ.) <http://doi.org/10.35330/1991-6639-2021-3-101-5-20>

17. Kiseleva EA, Kraeva AA, Savinova YS. Review of fuzzy logic in management. *International journal of applied sciences and technology Integral*. 2019. № 3. С. 401–405. (In Russ.) EDN: WHWWVT

18. Kulmamirov SA, Rakhimberdin DR. Possibilities of the theory of fuzzy logic in risk analysis of information security systems. *Synergy of sciences*. 2020;54:817–831. (In Russ.) EDN: WTMRZP

Сведения об авторе

Меркулов Александр Александрович, аспирант кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; ORCID: 0009-0006-0211-808X; e-mail: amerkulov@levelgroup.ru

About the author

Alexander A. Merkulov, Postgraduate student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; ORCID: 0009-0006-0211-808X; e-mail: amerkulov@levelgroup.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-4-368-379

УДК 62-762.445

EDN: EYVRWH

Научная статья / Research article

Численное моделирование контактного взаимодействия профилированных металлических уплотнений во фланцевых соединениях авиационной техники

Л.И. Миронова[✉], О.А. Колесник^{ORCID}, Д.Б. Босак^{ORCID}

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

✉ mironova_lub@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 22 сентября 2024 г.

Доработана 14 ноября 2024 г.

Принята к публикации: 21 ноября 2024 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Нераздельное соавторство

Аннотация. Актуальность исследования обосновывается разработкой фланцевых соединений герметичных конструкций авиационной техники в условиях ограничения веса и материалоемкости при одновременном увеличении их технико-энергетических характеристик за счет повышения давлений и температур рабочей среды в гидравлических и пневматических системах. Прочность фланцевых соединений обеспечивается надежностью изоляции рабочей среды, степенью герметичности элементов конструкции и достигается применением уплотнительных элементов, выполненных в виде уплотнения или уплотнительных устройств. Отмечено, что к перспективным конструкциям в настоящее время относятся фланцевые соединения с профилированными металлическими уплотнениями, для которых в настоящее время отсутствуют нормативные документы, предусматривающие единые подходы к расчету проектных параметров. Цель исследования — математическая формализация процесса формирования уплотняемого стыка. Приведен краткий анализ известных решений контактных задач методами теории упругости. Отмечены ограничения в получении решений аналитическими и численными методами, связанные с нелинейной зависимостью между внешней действующей силой и вызванным ею перемещением точек контактирующих тел даже при работе материала в упругой области. Сформулирована постановка контактной задачи. Предложены математическая модель упругого контакта двух и более тел, подверженных сжатию, и алгоритм численного решения, основанный на методе МКЭ интегрирования уравнений теории упругости. Алгоритм реализован в программной среде Abaqus CAE. Приведены результаты моделирования контактного взаимодействия элементов уплотняемого стыка в пространственной постановке на примере натурной конструкции фланцевого соединения с полым металлическим уплотнением торообразной формы.

Ключевые слова: фланцевые соединения, уплотнение, трубопровод, теория упругости, контактное давление, упругопластическое деформирование, цилиндрическая жесткость, твердое тело



Для цитирования

Миронова Л.И., Колесник О.А., Босак Д.Б. Численное моделирование контактного взаимодействия профилированных металлических уплотнений во фланцевых соединениях авиационной техники // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 4. С. 368–379. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-368-379>

Numerical Modelling of Contact Interaction of Profiled Metal Gaskets in Aircraft Flange Connections

Lyubov' I. Mironova[✉], Oleg A. Kolesnik^{id}, Daniil B. Bosak^{id}

Moscow Aviation Institute (State National Research University), Moscow, Russia

✉ mironova_lub@mail.ru

Article history

Received: September 22, 2024

Revised: November 14, 2024

Accepted: November 21, 2024

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution

Undivided co-authorship.

Abstract. The relevance of the research is justified by the development of flange connections of hermetic structures of aeronautical equipment under conditions of weight and material intensity limitation with simultaneous increase of their technical and energetic characteristics. The strength of flange connections is ensured by the reliability of the isolation of the working medium, the tightness of the design elements and is achieved by the use of sealing elements in the form of gaskets or sealing devices. The relevance of the research is stated, the aim of which is the mathematical formalisation of the process of formation of a compacted joint. A brief analysis of known solutions of contact problems by methods of elasticity theory is given, and limitations in obtaining solutions by analytical and numerical methods. A mathematical model of elastic contact between two or more bodies subjected to compression and a numerical solution algorithm based on the FEM method. The algorithm is implemented in the Abaqus CAE software environment. The results of the modelling of the contact interaction of the elements of the sealed joint in the spatial formulation are presented as an example of a full-scale design of a flange joint with a toroidal hollow metal gasket. is a combination of wavelet transformation and neural network learning.

Keywords: flange connections, gasket, pipeline, elasticity theory, contact pressure, elastoplastic deformation, cylindrical stiffness, solid body

For citation

Mironova LI, Kolesnik OA, Bosak DB. Numerical modelling of contact interaction of profiled metal gaskets in aircraft flange connections. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(4):368–379 (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-368-379>

Введение

В летательных аппаратах широко применяются силовые гидравлические приводы с питанием от централизованных гидросистем. Данные агрегаты представляют собой сложные технические системы, функционирование которых осуществляется работой гидравлических устройств, передающих энергию носителя по разветвлен-

ным трубопроводным коммуникациям. Системы имеют большое количество стыковочных узлов в трубопроводах, соединение которых осуществляется различными способами: либо сваркой, либо механическим путем — развальцовкой или с помощью резьбовых, фланцевых и бугельных соединений [1–5]. В настоящее время широкое распространение получили фланцевые соединения трубопроводов с металлическими профи-

лированными уплотнениями, конструктивные исполнения которых приведены на рис. 1. Применяемые уплотнения имеют фасонный профиль и представляют собой, как правило, формованную тонкостенную конструкцию¹.

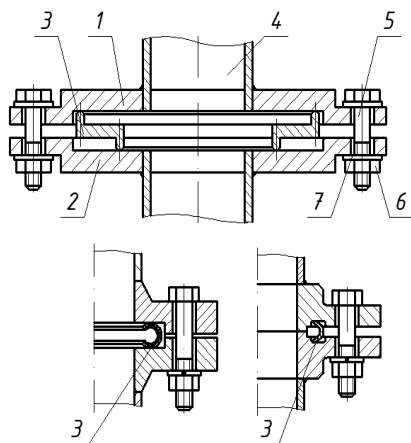


Рис. 1. Фланцевые соединения с металлическими уплотнениями:

1, 2 — фланцы; 3 — металлическое уплотнение;
4 — трубопровод; 5 — болт; 6 — гайка; 7 — шайба

И с т о ч н и к: выполнено Л.И. Мироновой,
О.А. Колесником, Д.Б. Босаком в программе AutoCAD

Figure 1. Flange connections with metal gaskets:

1, 2 — flanges; 3 — metal gasket; 4 — pipeline;
5 — bolt; 6 — nut; 7 — washer

S o u r c e: make by L.I. Mironova,
O.A. Kolesnik, D.B. Bosak in AutoCAD

Методы расчета на прочность фланцевых соединений с металлическими уплотнениями заключаются в формализации большого числа факторов, оказывающих влияние на величину и распределение контактных нагрузок, передающихся на уплотнительный элемент при сближении фланцев, а также вызванные ими деформации уплотнения. От величины деформаций зависит несущая способность уплотнительного стыка и плотность контакта, обеспечивающие надежную герметизацию конструкции в целом.

Расчетная модель уплотнительного стыка должна отражать те условия, при которых про-

исходит деформация металлического уплотнения, а именно взаимодействие уплотнительного элемента с контактирующими поверхностями фланцев и рабочей герметизирующей средой, а также условия нагружения. Вследствие соприкосновения контактируемых поверхностей, а также дальнейшей их упругопластической деформации образуются не только контактные площадки, но и внедрение одних поверхностей в др. Величина и форма внедрения таких поверхностей характеризуются степенью плотности контакта. Отсюда возникает необходимость определения потребного контактного давления, размеров контактной площадки и деформации контактируемых поверхностей, обусловленных кинематическим сближением фланцев в процессе затяжки болтов при сборке стыкуемой конструкции [6].

Цель исследования — математическая формализация процесса формирования уплотняемого стыка соединения, заключающаяся в разработке адекватной расчетной модели и проведении численного моделирования контактного взаимодействия двух и более тел.

1. Модели и методы исследования

Значительный объем проведенных исследований, направленных на обеспечение надежности герметичных неподвижных стыков в трубопроводах авиационного оборудования, часто базируется на рассмотрении задач теории упругости и пластичности, а также на решении контактных задач. Наиболее распространенной модельной задачей является задача о давлении жесткого штампа на упругое полупространство [7–9]. В рассмотрении контактных задач методами теории упругости следует выделить задачи о распределении напряжений на контуре отверстия, расположенного в неограниченной плоскости [10–12] и о действии нормальной сосредоточенной силы на границу упругой полу-

¹ См.: 3,207,524. SEAL. Nicholas D. Trbovich, 59 Fieldcrest Court, West Seneca, N.Y. Filed July 23, 1962, Ser. No. 211, 569. 4 Claims. P. 277–206; US3520544. YRING SEAL. Dudley D. Taylor, Greenbelt, Md., assignor to Pressure Since, Inc., Beltsville, Md., a corporation of Mary. Continuation of application Ser. No. 553,361, May 27, 1966. This application. Nov. 6, 1968, Ser. No. 774, 603. Int. C. F1615/08. U.S. P. 277–206; [6; 7].

плоскости [13]. Данный класс задач позволяет найти решения в рамках плоской теории упругости, но имеет ряд ограничений, связанных с определением формы и площади выдавливаемого металла, заполняющего зазоры в уплотнительном стыке соединения.

К известным решениям контактных задач относится задача о сжатии двух цилиндров неограниченной длины, которая широко используется в расчетах напряжений при контакте тел, преимущественно из металлических материалов с неплоскими поверхностями сопряжения. Аналитическое решение этой задачи впервые получил немецкий ученый Г. Герц. Одной из особенностей контактных задач такого типа является нелинейная зависимость между внешней действующей силой и вызванным ею перемещением точек контактирующих тел даже при работе материала в упругой области. Определение такой взаимосвязи связано с математическими трудностями. Линейная зависимость проявляется лишь в случае, если площадь контакта в процессе нагружения остается неизменной [14].

В контактных задачах при расчете деталей из гиперупругих материалов (резины, полиуретана и др.) часто используют двухпараметрический потенциал Муни — Ривлина [15; 16].

На основе модели Муни — Ривлина в [16] проведена оценка эффективности уплотнительного устройства гидроцилиндра, в котором в качестве уплотнения рассматривалась резиновая прокладка прямоугольного сечения. Оптимизация характерных размеров герметичного соединения была проведена с использованием программной среды Ansys Workbench и пакета MATLAB. Отмечено, что эффективность уплотнения обусловлена большой деформацией материала прокладки и значительных сил трения, возникающих при сжатии между уплотнительной резиной и верхним и нижним фланцами.

В [17] оценка герметичности фланцевых соединений проводилась с использованием теории Козени — Кармана. Согласно принятой модели пространство между контактирующими поверхностями уплотнения и фланца представлялось в виде эквивалентного пористого слоя. Утечка

герметизируемой среды определялась с учетом давления и свойств рабочей жидкости, а также определения длины контактных кромок и контактного усилия при нагружении уплотняемого стыка.

Численные и аналитические решения рассмотренного ряда контактных задач построены на определении искомых контактных давлений и напряжений, а также получении количественной информации о процессе формирования контактных площадок, характеризующих степень плотности контакта. При этом отметим, что область контакта уплотнения с уплотняемой поверхностью по структуре не является однородной. В ней отсутствует полная оплошность из-за наличия пустот на границах контакта и неоднородной деформации материала. Требуемый уплотняющий эффект должен достигаться заполнением всех микронеровностей и дефектов контактной поверхности [18].

Таким образом, проблема оценки плотности контакта между взаимодействующими элементами уплотнительного стыка по-прежнему остается актуальной в выборе проектных параметров фланцевых соединений [19]. Предлагается следующий подход в исследовании контактного взаимодействия элементов уплотнительного стыка на примере фланцевого соединения с полым металлическим уплотнением торообразной формы.

2. Разработка расчетной модели для исследования контактного взаимодействия элементов фланцевого соединения с металлическим уплотнением полый торообразной формы

Конструкция фланцевого соединения с полым металлическим уплотнением торообразной формы приведена на рис. 2.

Уплотнение в процессе сборки устанавливается в кольцевую канавку нижнего фланца. При сближении фланцев посредством затяжки болтов в некоторый момент происходит начальный контакт между уплотнением и опорными поверхностями канавки на фланцах. При дальнейшем сжатии опорных поверхностей и упруго-

пластической деформации контактирующих элементов образуются не только контактные площадки, но и может быть внедрение одних поверхностей в другие. Степень плотности контакта оценивается величиной контактных площадок и формой контактирующих поверхностей.

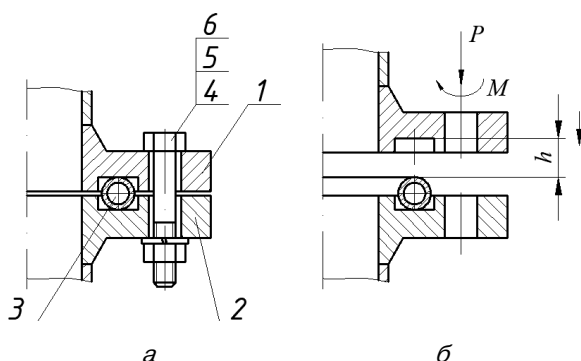


Рис. 2. Фланцевое соединение:

а — эскиз сборки; *б* — схема соединения в процессе сборки: 1, 2 — неконтактируемые фланцы; 3 — металлическое уплотнение; 4 — болт; 5 — гайка; 6 — шайба

Источники: выполнено Л.И. Мироновой, О.А. Колесником, Д.Б. Босак в программе AutoCAD

Figure 2. Flange connections:

a — sketch of assembly; *b* — scheme of connection in the process of assembly: 1, 2 — non-contacting flanges; 3 — metal gasket; 4 — bolt; 5 — nut; 6 — washer

Source: made by L.I. Mironova, O.A. Kolesnik, D.B. Bosak in AutoCAD

Исследование контактного взаимодействия целесообразно рассмотреть на примере расчетной модели в виде механической системы контактного взаимодействия двух и более тел при сжатии. По свойствам тела отличаются геометрической жесткостью и параметрами упругости.

Постановку задачи сформулируем следующим образом. Пусть уплотняемый стык разъемного соединения в поперечном сечении моделируется сжатием тонкостенного упругопластического тела в виде кольца двумя упругими полуплоскостями, одна из которых неподвижна, другая сближается заданным образом. Контакт происходит между абсолютно-жесткими или упругими прямолинейными площадками полу-

плоскостей и упругопластическим телом круговой формы. Образованная контактная площадка обусловлена деформацией тел без взаимного проникновения друг в друга. Силы трения при контакте отсутствуют. Плотность контакта в системе обеспечивается сжатием полуплоскостей усилием P до значения, удовлетворяющего условию герметичности, при котором допустимые утечки рабочей среды соответствуют требованиям нормативных документов. Возникающие в сжатом теле деформации изменяют только его форму, заполняющую зазоры в уплотняемом стыке. Требуется определить распределение деформаций в контактирующих телах и величину образующихся контактных площадок.

Поскольку размеры контактной площадки неизвестны, как и неизвестна величина сжимающей силы, задачу будем решать численным методом, пошагово задавая ход движения верхней полуплоскости и определяя деформации сжимаемого тела через известные соотношения теории упругости.

Разобьем область сближения тел на равные подобласти m таким образом, что каждый последующий шаг N рассматривает подобласть $m(N)$.

При построении математической модели в каждой подобласти $m(N)$ следует выразить перемещения точек контактирующих тел через силовые факторы сжатия полуплоскостей, адекватные кинематическому сближению фланцев при затяжке болтов. Имеем

$$\{P\}^{(N)} = [K]^{(N)} \{\delta\}^{(N)}, \quad (1)$$

здесь $\{P\}^{(N)}$ — силы, вызываемые перемещение узловых точек; $[K]^{(N)}$ — матрица жесткости элемента подобласти; $\{\delta\}^{(N)}$ — узловые перемещения; N — номер шага.

Следуя [20], в плане поместим произвольно контактирующие тела (i, j, k) заданной формы в декартову систему координат XOY (рис. 3). Поперечное сечение уплотняемого стыка определяется координатами местной системы координат $\eta\theta\xi$, проходящей через центр тела i

(рис. 3, а). Связь между общей и местной системами координат осуществляется вектором $\mathbf{R}$ и направляющими косинусами.

Пусть тело i установлено в канавке тела j и подвергается сжатию путем кинематического сближения тела k с телом j на величину $d > h$. Области предполагаемых контактов тела i с телом j и тела i с телом k обозначим S_{ij} и S_{ik} соответственно. Точки C_{iq} , C_{jq} , C_{kq} , принадле-

жащие этим поверхностям, могут вступать в контакт друг с другом. Контактирующие пары точек назовем сопряженными. Контактирующие точки поверхностей пронумеруем номером q ($q = 1, 2, \dots$). При начальном контакте тела k с телом i предполагаем, что положение точки C_{k1} совпадет с положением сопряженной точки C_{i1} . По условию задачи в противоположном полюсе имеем $C_{i1} \equiv C_{j1}$ (рис. 4, а).

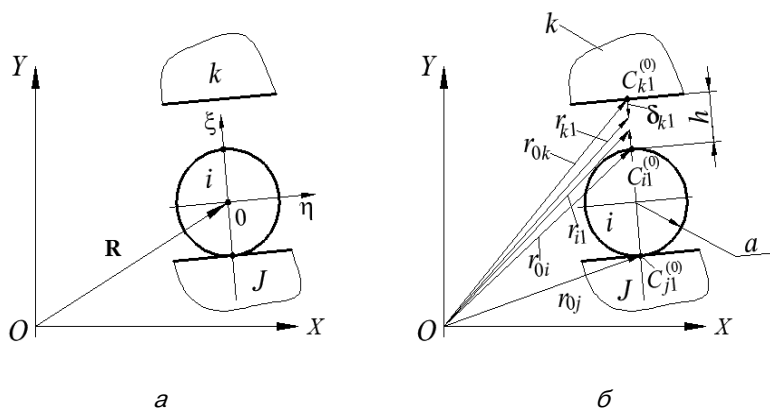


Рис. 3. Расчетная схема контакта двух и более тел:

a — исходное положение тел в выбранной системе координат;

b — векторы перемещения тел в исходном положении тел

Источники: выполнено Л.И. Мироновой, О.А. Колесником, Д.Б. Босаком в программе AutoCAD

Figure 3. Scheme of calculation of contact of two or more bodies:

a — initial position of the bodies in the chosen coordinate system;

b — vectors of displacement of the bodies in the initial position of the bodies

Source: make by L.I. Mironova, O.A. Kolesnik, D.B. Bosak in AutoCAD

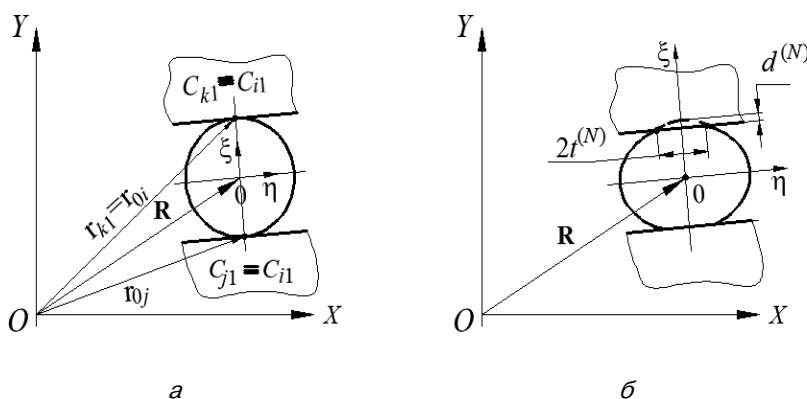


Рис. 4. Расчетная схема сближения тел k и j :

a — начальный контакт тел; b — сближение тела k на величину $d > h$ на шаге m

Источники: выполнено Л.И. Мироновой, О.А. Колесником, Д.Б. Босаком в программе AutoCAD

Figure 4. Calculation scheme for the approach of bodies k and j :

a — initial contact of the bodies; b — approach of body k by the value $d > h$ at step m

Source: make by L.I. Mironova, O.A. Kolesnik, D.B. Bosak in AutoCAD

Предполагая, что деформация сжимаемого тела i , установленного в канавке нижней полуплоскости, развивается одинаково за счет реактивного давления, в локальной системе координат рассматриваем упругую осесимметричную задачу. Расчеты будем проводить только для верхней области контакта тел i и k .

Считаем, что при кинематическом сближении полуплоскостей k и j действующие сжимающие нагрузки на тело i , обусловленные усилиями затяжки болтов, постоянны и равномерно распределены по поверхности контакта. При отсутствии сил трения такие нагрузки вызывают деформацию тела i , приводящую к образованию контактной площадки шириной $2t$ (рис. 3, б), на которой действуют нормальные контактные напряжения $q(x)$ [14]. Принимаем контактные напряжения положительными, если они направлены в сторону внутренней нормали к поверхности контакта. Равномерно распределенные по поверхности контакта сжимающие нагрузки p определяем из условия равновесия

$$p = \int_{-t}^t q(x) dx. \quad (2)$$

В пошаговом рассмотрении сближения верхней полуплоскости k с телом i векторы перемещения сопряженных точек $\mathbf{r}_{iq}$ и $\mathbf{r}_{kq}$ будут описываться следующими соотношениями:

$$\mathbf{r}_{iq} = \mathbf{r}_{0i} + \boldsymbol{\delta}_{iq}; \quad \mathbf{r}_{kq} = \mathbf{r}_{0k} + \boldsymbol{\delta}_{kq}, \quad (3)$$

где $\mathbf{r}_{0k}$ и $\mathbf{r}_{0i}$ — векторы исходного положения сопряженных точек; $\boldsymbol{\delta}_{iq}$ и $\boldsymbol{\delta}_{kq}$ — векторы перемещения точек C_{iq} и C_{kq} при сближении тел i и k .

Условием контакта рассматриваемых точек будет соблюдение равенства

$$(\mathbf{r}_{0i} - \mathbf{r}_{0k}) \times \mathbf{n}_{iq} = 0 \quad \text{при } C_{iq} \in S_{ik}, \quad (4)$$

где $\mathbf{n}_{iq}$ — внешняя нормаль, которая пересекается с областью S_{ik} .

Для сопряженных неконтактирующих точек условие принимает вид

$$(\mathbf{r}_{0i} - \mathbf{r}_{0k}) \times \mathbf{n}_{iq} < 0 \quad \text{при } C_{iq} \in S_{ik}. \quad (5)$$

С учетом равенства (3) из соотношения (4) получим условие совместности перемещений [15]

$$(\mathbf{r}_{0i} - \mathbf{r}_{0k}) \times \mathbf{n}_{iq} = (\boldsymbol{\delta}_{kq} - \boldsymbol{\delta}_{iq}) \times \mathbf{n}_{iq}$$

при $C_{iq} \in S_{ik}$. (6)

Поскольку правая часть соотношения (1) представляет собой уравновешивающие силы, вызванные перемещениями узлов, уравнение равновесия контактного взаимодействия тел i и k в подобласти $m(N)$ запишем в виде

$$\begin{bmatrix} K_i + K_\Gamma & -K_\Gamma \\ -K_\Gamma & K_k + K_\Gamma \end{bmatrix}^{(N)} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\delta}_i \\ \boldsymbol{\delta}_k \end{Bmatrix}^{(N)} = \begin{Bmatrix} \mathbf{P}_i \\ \mathbf{P}_k \end{Bmatrix}^{(N)}, \quad (7)$$

где K_i , K_k — матрицы жесткости соответственно тел i и k без учета контактного взаимодействия; K_Γ — матрица жесткости контактного слоя, коэффициенты которой характеризуют жесткости связей сопряженных точек в общей системе координат [14]; $\boldsymbol{\delta}_i$, $\boldsymbol{\delta}_k$ — векторы узловых перемещений; $\mathbf{P}_i$, $\mathbf{P}_k$ — векторы узловых внешних статических нагрузок, действующих на тела i и k .

Граничные условия для тела i можно задать в виде перемещений в закрепленной зоне, а граничные условия телу k можно задать только в виде сил. При отсутствии контакта между телами i и k (см. рис. 3) уравнение равновесия для изолированных тел имеет вид

$$\begin{bmatrix} K_i & 0 \\ 0 & K_k \end{bmatrix}^{(N)} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\delta}_i \\ \boldsymbol{\delta}_k \end{Bmatrix}^{(N)} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \mathbf{P}_k \end{Bmatrix}^{(N)}. \quad (8)$$

В общей системе координат коэффициенты матрицы жесткости контактного слоя определяются соотношением

$$[K_\Gamma]^{(N)} = [\lambda]^{T(N)} [K_{\eta 0 \xi}]^{(N)} [\lambda]^{(N)}, \quad (9)$$

где $[K_{\eta 0 \xi}]^{(N)}$ — матрица жесткости связей в местной системе координат; $[\lambda]^{(N)}$ — матрица направляющих косинусов; T — индекс транспонирования.

Система решения уравнений (7) является нелинейной. Ее решение может быть проведено по следующему алгоритму. На каждом шаге N предварительно задаются ход сближения d полуплоскостей и узлы контакта $C_{iq} \in S_{ik}$ на i и k телах. Крайние узлы определяют границы контактной площадки.

По найденным смещениям контактных пар определяются контактные усилия в сопряженных узлах

$$\{\mathbf{P}\}^{(N)} = [K_{\eta 0 \xi}]^{(N)} [\lambda]^{(N)} (\delta_{kq} - \delta_{iq}). \quad (10)$$

Нормальная составляющая вектора контактных усилий проверяется на знак. Для узлов, в которых она положительна, полагается, что $[K_{\eta 0 \xi}]^{(N)} = 0$, что означает отсутствие контактного слоя. Вычисления повторяются. Процесс поиска зоны контакта заканчивается при

отрицательном значении контактных нагрузок с одновременным выполнением условия (5).

3. Результаты

Реализация численного моделирования контактного взаимодействия элементов уплотняемого стыка в пространственной постановке выполнена в программном комплексе Abaqus CAE 2021.HF9 на примере натурной конструкции фланцевого соединения с полым металлическим уплотнением торообразной формы (рис. 5–8).

Исходные данные: геометрические параметры уплотнения $\varnothing 66 \times 0,8$ мм; материал уплотнения — алюминий; материал фланцев — малоуглеродистая сталь. Нагружение модели осуществлялось кинематическим сближением пластин на 2,5 мм после начального касания поверхностей пластин с уплотнением.

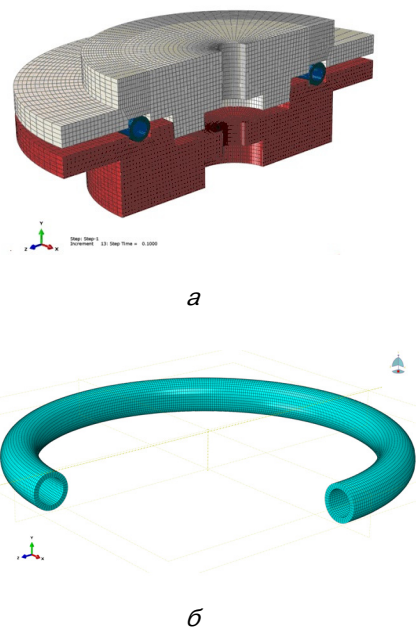


Рис. 5. Конечно-элементные модели:
 а — общий вид модели;
 б — модель уплотнения торообразной формы
 И с т о ч н и к: выполнено Л.И. Мироновой,
 О.А. Колесником, Д.Б. Босаком в программе AutoCAD

Figure 5. Finite element models:
 а — general view of the model; б — torus seal model
 S o u r c e: make by L.I. Mironova, O.A. Kolesnik,
 D.B. Bosak in the Abaqus CAE

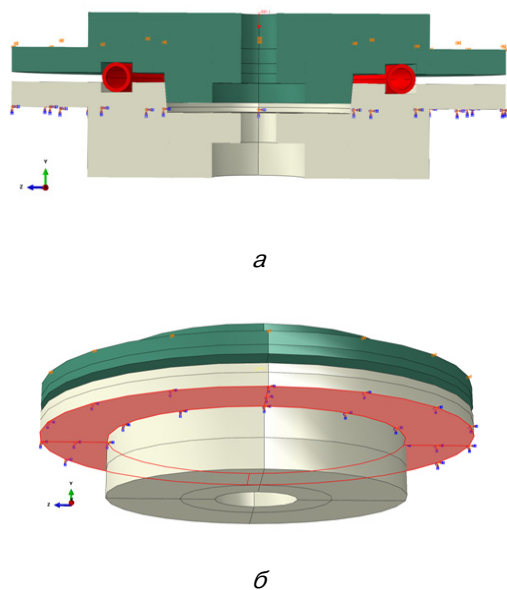


Рис. 6. Схема нагружения:
 а — перемещение по оси Y на 0,25 мм; б — граничные условия, жесткое защемление по всем степеням свободы
 И с т о ч н и к: выполнено Л.И. Мироновой,
 О.А. Колесником, Д.Б. Босаком в программе Abaqus CAE

Figure 6. Loading scheme:
 а — Y -axis movement of 0.25 mm; б — boundary conditions, rigid clamping along all degrees of freedom
 S o u r c e: make by L.I. Mironova, O.A. Kolesnik,
 D.B. Bosak in the Abaqus CAE

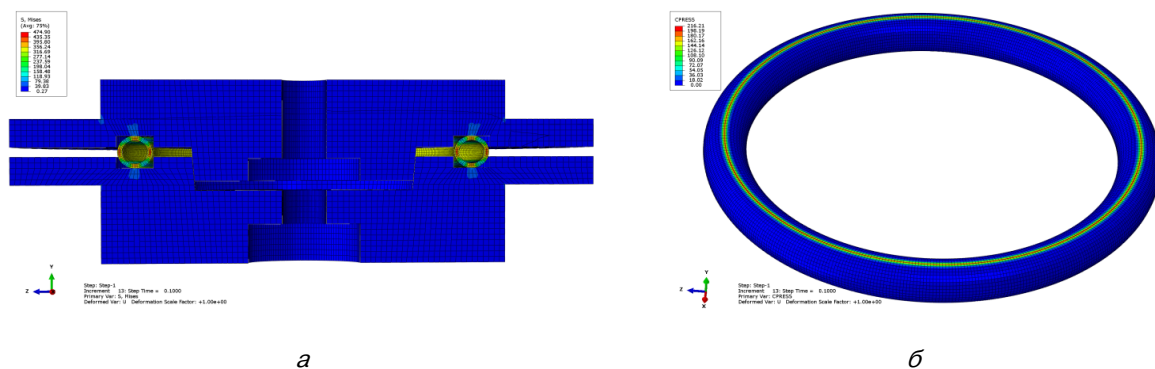


Рис. 7. Результаты моделирования:

a — эквивалентные напряжения по Мизису, МПа; *б* — контактные давления

И с т о ч н и к : выполнено Л.И. Мироновой, О.А. Колесником, Д.Б. Босаком в программе Abaqus CAE

Figure 7. Modeling Results:

a — Mises equivalent stresses in the gasket, MPa; *б* — Contact pressure, MPa

S o u r c e : make by L.I. Mironova, O.A. Kolesnik, D.B. Bosak in the Abaqus CAE

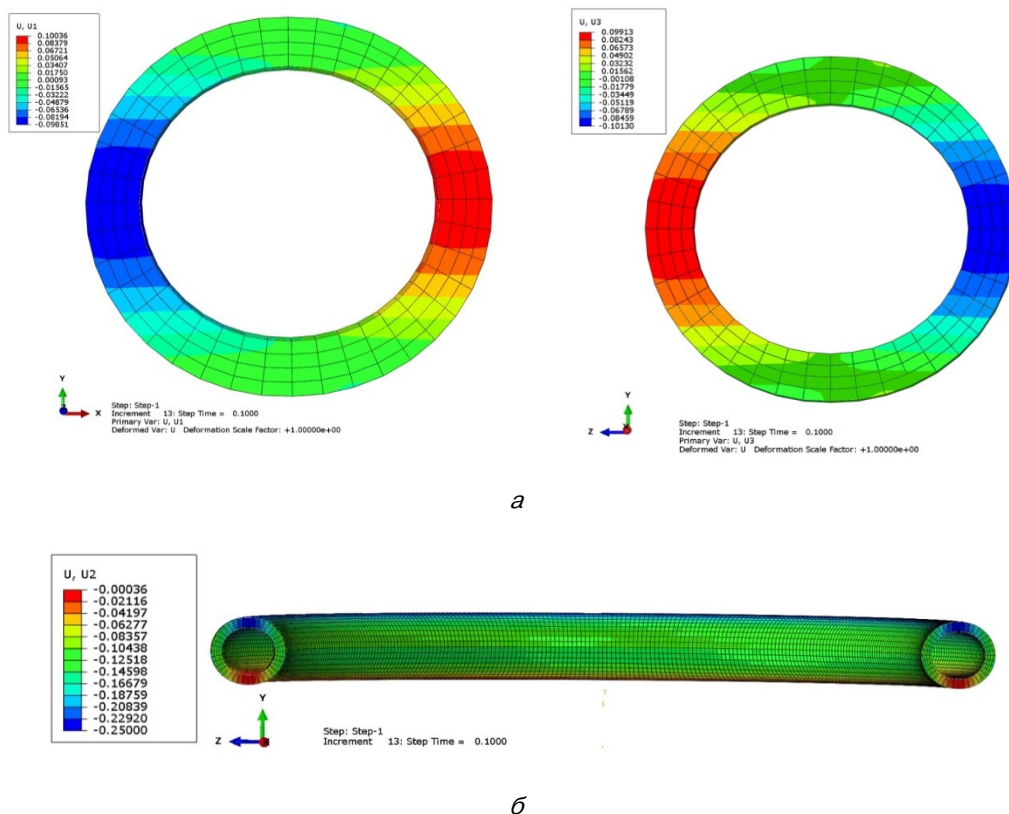


Рис. 8. Перемещения в уплотнении, мм:

a — осей *X*(слева) и *Z*(справа); *б* — вдоль оси *Y*

И с т о ч н и к : выполнено Л.И. Мироновой, О.А. Колесником, Д.Б. Босаком в программе Abaqus CAE

Figure 8. Movements in the gasket, mm:

a — *X*-axis movements (left); *Z*-axis displacements (right); *б* — *Y*-axis displacements

S o u r c e : make by L.I. Mironova, O.A. Kolesnik, D.B. Bosak in the Abaqus CAE

Заключение

1. К числу перспективных конструкций в настоящее время относятся фланцевые соединения с профилированными металлическими уплотнениями, для которых пока отсутствуют нормативные документы, предусматривающие единые подходы к расчету проектных параметров. Методы расчета на прочность таких соединений заключаются в формализации большого числа факторов, оказывающих влияние на величину и распределение контактных нагрузок, передающихся на уплотнительный элемент при сближении фланцев, а также вызванные ими деформации уплотнения.

2. Приведен краткий анализ известных решений контактных задач методами теории упругости. Отмечены ограничения в реализации расчетных моделей применительно к исследованию напряженно-деформированного состояния профилированных металлических уплотнений и определению потребного контактного давления для надежной герметизации уплотнительных стыков.

3. Предложены математическая модель упругого контакта двух и более тел, подверженных сжатию, и алгоритм численного решения контактной задачи. Алгоритм реализован в программной среде Abaqus CAE 2021.HF9. Проведено моделирование контактного взаимодействия элементов уплотняемого стыка на примере натурной конструкции фланцевого соединения с полым металлическим уплотнением торообразной формы.

4. Получены следующие результаты. При сближении фланцев на 2,5 мм форма полого уплотнения в поперечном сечении изменилась от окружности до эллипса с образованием в радиальном направлении контактной площадки малой величины. Иллюстративная картина деформации формы уплотнения получена без учета полной силовой схемы фланцевого соединения с неконтактирующими фланцами. Максимальное контактное давление возникает в верхнем и нижнем полюсе сечения прокладки, величина которого составила 216 МПа. Максималь-

ные эквивалентные напряжения по Мизису в полюсах прокладки составили 475 МПа. Качественная картина распределения контактного давления (напряжения) сопоставима с решением задачи Герца о контактном взаимодействии двух цилиндров. Однако вопрос определения плотности контакта, при котором обеспечивается надежное герметичное соединение, пока остается открытым. Для этого надо проводить дополнительные теоретические исследования с построением новых расчетных моделей, учитывающих особенности контактного взаимодействия всех элементов соединения в условиях сложного нагружения герметичной конструкции.

Список литературы

1. Волошин А.А., Григорьев Г.Г. Конструирование и расчет фланцевых соединений. Ленинград : Машиностроение, 1979. 125 с.
2. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. Москва : Машиностроение, 1990. 368 с.
3. Mayer E. Axiale Gleitringdichtungen. VDI Verlag GmbH, Dusseldorf, 1974. 291 p.
4. Kondratenko L., Mironova L. Contact Stresses during Roller Rolling of Heat-Exchange Tube // Key Engineering Materials. 2022. Vol. 910. P. 55–60. <https://doi.org/10.4028/p-790080>
5. Boikov A., Mironova L., Shishkin S. About One of the Approaches for the Research of the Stress-Strain State of a Flange Connection with a Seal Made of an Alloy with Shape Memory // Materials Research Proceedings. 2022. Vol. 21. P. 156–160. <https://doi.org/10.21741/9781644901755-28>
6. Босак Д.Б., Колесник О.А., Миронова Л.И. Об одном подходе к решению некорректной задачи в разработке алгоритмов проектировочных расчетов применительно к полым уплотнительным элементам фланцевых соединений // Материалы XV Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2024). Москва : Изд-во МАИ, 2024. С. 127–129.
7. Hill R. The Mathematical theory of plasticity. Oxford : Clarendon press, 1950.
8. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. Москва : Наука, ГФМЛ, 1980. 304 с.
9. Соколовский В.В. Теория пластичности. Москва : Высшая школа, 1969. 608 с.

10. Штаерман И.Я. Контактная задача теории упругости. Москва–Ленинград : Гостехиздат, 1949. 270 с.
11. Сухарев И.П. Прочность шарнирных узлов машин: справочное пособие. Москва : Машиностроение, 1977. 168 с.
12. Кожевников В.Ф. Напряженное состояние растягиваемой с заполненным отверстием // Ученые записки ЦАГИ. 1976. Т. 7. № 6. С. 90–98. EDN: RPXTOL
13. Timoshenko S., Goodier J.N. Theory of elasticity. New York-Toronto-London : McGraw-Hill Publ., 1951. 506 p.
14. Иосилевич Г.Б. Концентрация напряжений и деформаций в деталях машин. Москва : Машиностроение, 1981. 223 с.
15. Белкин А.Е., Дахтиев И.З., Костромских А.В. Определение параметров упругости полиуретана при больших деформациях по результатам испытаний образцов на кручение и растяжение // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 8 (677). С. 3–10.
16. Zhang H., Sun Y., Li C., Wang H. Optimal Design of the Sealing Structure of a Hydraulic Cylinder on the Basis of a Surrogate Model // Advances in Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 2020. Article no. 1753964. <https://doi.org/10.1155/2020/1753964>
17. Шишкин С.В., Бойков А.А. К расчёту на герметичность фланцевого соединения трубопроводов с Z-образным металлическим уплотнением при воздействии внешней осевой силы // Труды МАИ. 2021. № 116. <https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-04>
18. Кондрашов Ю.И., Сергеев Р.Н. О некоторых вопросах оценки герметичности клапанных уплотнений // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16. № 3. С. 155–164. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2017-16-3-155-164>
19. Миронова Л.И., Колесник О.А., Босак Д.Б. Расчётные модели контактного взаимодействия элементов уплотнительного стыка во фланцевых соединениях авиационной техники // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2024. № 27. С. 17–23. EDN: OKXMMK
20. Бегеев Т.К., Гришин В.И. Решение упруго-пластических задач о контактном взаимодействии тел методом конечных элементов // Ученые записки ЦАГИ. 1990. Т. 21. № 3. С. 88–94. EDN: MVCNPL
3. Mayer E. *Axiale Gleitringdichtungen*. VDI Verlag GmbH, Dusseldorf; 1974.
4. Kondratenko L, Mironova L. Contact Stresses during Roller Rolling of Heat-Exchange Tube. *Key Engineering Materials*. 2022;910:55–60. <https://doi.org/10.4028/p-79008o>
5. Boikov A, Mironova L, Shishkin S. About One of the Approaches for the Research of the Stress-Strain State of a Flange Connection with a Seal Made of an Alloy with Shape Memory. *Materials Research Proceedings*. 2022; 21:156–160. <https://doi.org/10.21741/9781644901755-28>
6. Bosak DB, Kolesnik OA, Mironova LI. About one approach to solving an ill-posed problem in the development of design calculation algorithms in relation to hollow sealing elements of flange connections. *Proceedings of the XV International Conference on Applied Mathematics and Mechanics in Aerospace Industry (AMMAI'2024)*. Moscow: MAI; 2024. P. 127–129. (In Russ.)
7. Hill R. *The Mathematical theory of plasticity*. Oxford: Clarendon press; 1950.
8. Galin LA. *Contact problems of the theory of elasticity and viscoelasticity*. Moscow: Nauka, GFML Publ.; 1980. (In Russ.)
9. Sokolovskij V. *Plasticity theory*. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1969. (In Russ.)
10. Shtaerman I. *Contact problem of elasticity theory*. Moscow–Leningrad: Gostekhizdat Publ.; 1949. (In Russ.)
11. Suharev IP. *Strength of machine joints*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1977. (In Russ.)
12. Kozhevnikov VF. Tensile stress state with a filled hol. *TsAGI Science Journal*. 1976;7(6):90–98. (In Russ.) EDN: RPXTOL
13. Timoshenko S, Goodier JN. *Theory of elasticity*. New York–Toronto–London: McGraw-Hill Book Company; 1951.
14. Iosilevich GB. *Concentration of stresses and deformations in machine parts*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1981. (In Russ.)
15. Belkin AE., Dashtiev IZ., Kostromitskikh AV. Determining Polyurethane Elastic Parameters at Large Strains Using Torsion and Tensile Test Results. *BMSTU Journal of mechanical engineering*. 2016;8(677):3–10. (In Russ.)
16. Zhang H, Sun Y, Li C, Wang H. Optimal Design of the Sealing Structure of a Hydraulic Cylinder on the Basis of a Surrogate Model. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020;2020:1753964. <https://doi.org/10.1155/2020/1753964>
17. Shishkin SV, Boikov AA. Tightness analysis method for flange connection of pipes with metal Z-shape seal during the influence of external axial force. *Trudy MAI*. 2021;(116). (In Russ.) <https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-04>

References

1. Voloshin AA, Grigor'ev GG. *Design and calculation of flange connections*. Leningrad: Mashinostroenie Publ.; 1979. (In Russ.)
2. Birger IA, Iosilevich GB. *Threaded and flanged connections*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1990. (In Russ.)

18. Kondrashov YuI, Sergeev RN. Advanced methods for assessing sealing ability of valve seals. *Vestnik of Samara University. Aerospace and mechanical engineering*. 2017;16(3):155–164. (In Russ.) <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2017-16-3-155-164>

19. Mironova LI, Kolesnik OA, Bosak DB. Calculation models for the contact interaction of sealing joint

elements in flange joints of aviation equipment. *Transport, mining and construction engineering: Science and production*. 2024;(27):17–23. (In Russ.) EDN: OKXMMK

20. Begeev TK, Grishin VI. Solution of elastic-plastic problems of contact interaction of bodies by the finite element method. *TsAGI Science Journal*. 1990;21(3):88–93. (In Russ.) EDN: MVCNPL

Сведения об авторах

Миронова Любовь Ивановна, доктор технических наук, профессор кафедры проектирования сложных технических систем, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 9176-6803, ORCID: 0000-0002-0927-4679; e-mail: mironova_lub@mail.ru

Колесник Олег Александрович, аспирант кафедры проектирования сложных технических систем, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 3448-8854, ORCID: 0009-0009-8278-661X; e-mail: kolesnik.0leg@yandex.ru.

Босак Даниил Борисович, аспирант кафедры проектирования сложных технических систем, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 8757-5376, ORCID: 0009-0002-7206-1358; e-mail: daniil.bosak@gmail.com

About the authors

Lyubov' I. Mironova, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department Design of Complex Technical Systems, Moscow Aviation Institute (State National Research University), Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 9176-6803, ORCID 0000-0002-0927-4679; e-mail: mironova_lub@mail.ru.

Oleg A. Kolesnik, Graduate student of the Department Design of Complex Technical Systems, Moscow Aviation Institute (State National Research University), Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 3448-8854, ORCID: 0009-0009-8278-661X; e-mail: kolesnik.0leg@yandex.ru

Daniil B. Bosak, Graduate student of the Department Design of Complex Technical Systems, Moscow Aviation Institute (State National Research University), Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 8757-5376, ORCID: 0009-0002-7206-1358; e-mail: daniil.bosak@gmail.com



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-4-380-396

УДК 004.896

EDN: EZXRJG

Научная статья / Research article

Методы вибродиагностики от способов получения данных до их обработки современными средствами

А.О. Журавлев^a, А.О. Поляков^a, Д.А. Андриков^{a,b}✉

^a Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

^b Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

✉ andrikov-da@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 25 мая 2024 г.

Доработана 7 октября 2024 г.

Принята к публикации: 15 октября 2024 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Сегодня одним из основных направлений развития промышленности является цифровизация производственных процессов. Для того чтобы достичь высоких показателей производства, необходима надежность производственного оборудования, разрабатываются все более совершенные средства его самодиагностики. Таким образом, самодиагностика в совокупности с высоким уровнем автоматизированной аналитики позволяет с высокой долей вероятности предсказать неисправность, предупредить о сроках ее возникновения и способах превентивного устранения. Рассмотрены существующие методы вибродиагностики, в том числе и те, которые появились в течение четвертой промышленной революции, а именно в условиях широкого распространения и качественного применения систем машинного обучения, нейросетей и искусственного интеллекта. Описаны методы сбора первичной информации о вибрации и способы аналитики данных с помощью вышеперечисленных алгоритмов. Рассмотрены результаты экспериментальных применений различных аналитических механизмов, разработанных для определения вида дефектов вращающихся под механической нагрузкой деталей, перечислены преимущества и недостатки каждого из методов. Цель обзора — определение существующих методов вибродиагностики, определение их свойств и их сравнение. В результате анализа было установлено, что наиболее развивающимся направлением в области исследования вибросигналов является сочетание вейвлет-преобразования и нейросетевого обучения.

Ключевые слова: вибрационная диагностика, цифровая обработка сигналов, вейвлет, нейросеть, глубокое обучение, нестационарный объект



Вклад авторов

Журавлев А.О. — проведение анализа литературы, подготовка и редактирование текста. Поляков А.О. — обзор существующих базовых методов. Андриков Д.А. — научное руководство, концепция исследования; развитие методологии.

Для цитирования

Журавлев А.О., Поляков А.О., Андриков Д.А. Методы вибродиагностики от способов получения данных до их обработки современными средствами // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 4. С. 380–396. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-380-396>

Vibration Diagnostic Methods from Methods of Obtaining Data to Processing It Using Modern Means

Anton O. Zhuravlev^a, Alexey O. Polyakov^a, Denis A. Andrikov^{a,b}

^a RUDN University, Moscow, Russia

^b Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

 andrikov-da@rudn.ru

Article history

Received: May 25, 2024

Revised: October 7, 2024

Accepted: October 15, 2024

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest

Abstract. Today, one of the main directions of industrial development is the digitalization of production processes. In order to achieve high production rates, the reliability of production equipment is necessary; more and more advanced means of its self-diagnosis are being developed. Thus, self-diagnosis, combined with a high level of automated analytics, makes it possible to predict a malfunction with a high degree of probability, warn about the timing of its occurrence and methods of preventive elimination. This article discusses existing methods of vibration diagnostics, including those that appeared during the fourth industrial revolution, namely in the conditions of widespread and high-quality application of machine learning systems, neural networks and artificial intelligence. Methods for collecting primary information about vibration and methods for analyzing data using the above algorithms are described. The results of experimental applications of various analytical mechanisms developed to determine the type of defects in parts rotating under mechanical load are considered, and the advantages and disadvantages of each method are listed. The purpose of the review is to determine the existing methods of vibration diagnostics, determine their properties and compare them. As a result of the analysis, it was found that the most developing direction in the field of vibration signal research is a combination of wavelet transformation and neural network learning.

Keywords: vibration diagnostics, digital signal processing, wavelet, neural network, deep learning, non-stationary object

Authors' contribution

Zhuravlev A.O. — conducting literature analysis, preparing and editing text. Polyakov A.O. — review of existing basic methods. Andrikov D.A. — scientific management; research concept; methodology development.

For citation

Zhuravlev AO, Polyakov AO, Andrikov DA. Vibration diagnostic methods from methods of obtaining data to processing it using modern means. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(4):380–396 (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-380-396>

Введение

В условиях стремительно развивающейся промышленности растут и требования к надежности оборудования и транспорта. Большинство видов производственного оборудования имеют в своем составе вращающиеся детали и механизмы. Ключевую роль в определении технического состояния такого оборудования играет вибродиагностика.

В первую очередь рассмотрим средства вибрационной диагностики неисправностей вращающихся механизмов. К таким средствам относятся датчики вибрации, установленные на оборудовании в точках трехмерного контроля, средства приема сигналов, это могут быть различные контроллеры или осциллографы. Результатом работы такой системы диагностики является график амплитуды колебаний, график виброскорости и виброускорения относительно времени.

В данной статье мы рассмотрим основные методы получения информации о фактическом состоянии технологического оборудования исходя из картины реакционного поведения при вибрационном воздействии от вращающихся деталей и механизмов, находящихся в его составе. Проведем сравнение существующих методов аналитики вибрационных показателей на основе литературных источников. Определим и опишем будущее направление развития вибродиагностики и узнаем, какую роль в этом процессе будет играть искусственный интеллект. Сам подход вибродиагностики универсален и находит своё применение не только в промышленной сфере, но и в медицине — где, например, аускультация лёгких позволяет судить о состоянии здоровья [1].

1. Методы.

Краткое описание и сравнение

В первую очередь рассмотрим базовые методы определения основных вибрационных показателей.

1.1. Метод измерения общего уровня шума или вибрации

В этом случае в широких частотных диапазонах измеряются или среднеквадратичные значения, или пиковые значения виброускорения, виброскорости, или виброперемещения механических колебаний либо колебаний в газообразных или жидких средах.

При измерении общего уровня колебаний максимальный вклад могут давать несколько основных составляющих или даже одна доминирующая составляющая, например, составляющая на частоте вращения. Эта составляющая имеет, безусловно, большое значение, однако развивающиеся дефекты могут привести к росту других составляющих, уровень которых может быть значительно ниже уровня доминирующей составляющей. Таким образом, измерение общего уровня является слишком грубой оценкой с точки зрения определения технического состояния машины или оборудования и может быть использовано скорее для его контроля, чем для мониторинга, не говоря уже о глубокой детальной диагностике, требующей более тонких методов¹.

Достоинства метода:

- а) простой и легко применимый;
 - б) экономичный, для измерения общего уровня шума или вибрации не требуется дорогостоящее оборудование;
 - в) обеспечивает высокую точность измерений при правильной калибровке оборудования.
- К недостаткам можно отнести следующее:
- а) не позволяет определить источник шума или вибрации: метод измерения общего уровня шума или вибрации не дает возможности выявить источник шума или вибрации, что может затруднить поиск причин возникновения проблемы;
 - б) зависимость от окружающей среды: результаты измерений могут быть искажены в зависимости от окружающей среды (например, наличия других источников шума);

¹ Баркова Н.А., Дорошев Ю.С., Баркова Н.А. Неразрушающий контроль технического состояния горных машин и оборудования: учебное пособие для студентов специальности 150402 «Горные машины и оборудование» вузов региона. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. EDN: QMYWEB

в) необходимость проведения дополнительных измерений: для получения полной картины уровня шума или вибрации необходимо проводить дополнительные измерения на разных частотах и уровнях².

1.2. Метод измерения ударных импульсов

Метод измерения ударных импульсов основан на измерении амплитуды импульсов сигнала, полученного с помощью пьезоэлектрического преобразователя, резонансная частота которого составляет около 30–32 кГц [2]. Такой датчик имеет высокую добротность колебательной системы, т. е. первичный пьезопреобразователь имеет резонанс на частоте 30 кГц, что позволяет выделять энергию колебательного процесса на выбранной частоте (30 кГц) и усиливать амплитуду электрического сигнала. Недостатков у этого метода ударных импульсов значительно больше, чем у других методов, поэтому обычно этот метод реализуется в виброметрах как наиболее дешевых средствах виброконтроля. Главным является тот факт, что далеко не все зарождающиеся дефекты подшипника качения приводят к появлению ударных импульсов, и достаточно часто дефектный подшипник обнаруживается лишь незадолго до отказа, когда в нем развивается цепочка связанных дефектов, один или несколько из которых становятся источником ударных импульсов. Еще один недостаток — отсутствие информации о виде дефекта, без которой практически невозможно давать долгосрочный прогноз состояния, так как минимальный временной интервал от зарождения дефекта до отказа нормально работающего подшипника в зависимости от вида дефекта может составлять от нескольких месяцев до нескольких лет³.

Достоинства метода измерения ударных импульсов вибродиагностики:

а) высокая чувствительность к зарождающимся дефектам — метод измерения ударных импульсов позволяет обнаруживать малые изменения в состоянии оборудования, которые могут свидетельствовать о начальной стадии развития дефекта;

б) высокая точность и надежность измерений — метод измерения ударных импульсов обеспечивает высокую точность и надежность результатов измерений благодаря использованию специальных датчиков и анализаторов;

в) широкий диапазон применения — метод измерения ударных импульсов может применяться для контроля состояния различных типов оборудования, включая турбины, насосы, компрессоры и т.д.

К недостаткам метода измерения ударных импульсов вибродиагностики можно отнести:

а) высокую стоимость оборудования для проведения измерений ударных импульсов — необходимо использовать специализированные датчики и анализаторы, которые могут быть дорогими;

б) сложность интерпретации результатов измерений для правильной интерпретации результатов измерений ударных импульсов — необходимо иметь определенный опыт и знания в области вибродиагностики;

в) ограниченность в использовании при высоких частотах — метод измерения ударных импульсов может быть ограничен в использовании при высоких частотах, что может оказаться проблемой для некоторых типов оборудования.

1.3. Метод спектрального анализа

Спектральный анализ — это метод обработки сигналов, позволяющий выявить частотный состав сигнала. Выявление повышенных амплитуд вибрации на частотах, совпадающих

² Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б. Диагностика технологических систем: учебное пособие : в 2 частях. Часть 2. Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2014. 128 с. EDN: TVBAMV

³ Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин : учебное пособие. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. 360 с. EDN: QMHHFH

с частотами возможных повреждений элементов, резонансных частотах деталей, на частотах протекания рабочего процесса помогает обнаружить и идентифицировать неисправность на различных стадиях его развития.

Основные достоинства метода:

а) достаточно высокая помехозащищенность;

б) высокая информативность метода, существует возможность получить дифференцированную оценку состояния асинхронных двигателей отдельно по каждому его кинематическому узлу, поскольку они генерируют разные частотные ряды в спектре.

Основные недостатки, присущие диагностике по составляющим спектра вибрации:

а) сложность в аппаратной реализации: необходим дорогостоящий спектроанализатор, имеющий качественное программное обеспечение;

б) метод малочувствителен к зарождающимся и слабым дефектам; некорректность результатов при обработке нестационарных сигналов [3].

1.4. Метод спектрального анализа огибающей высокочастотной вибрации

Метод, который применяется для выявления начальных дефектов, является действенным, поскольку он анализирует высокочастотную вибрацию, которая получается с помощью датчика, расположенного рядом с диагностируемым узлом. Выделение огибающей может осуществляться двумя способами: обнаружением в амплитудных/фазовых детекторах или с помощью интегрального преобразования Гильберта в цифровых анализаторах.

Метод огибающей широко используется для диагностики подшипников качения [4; 5], так как он позволяет определить тип дефекта.

Достоинства метода спектрального анализа огибающей высокочастотной вибрации:

а) этот метод позволяет обнаруживать начинающиеся дефекты, что позволяет предпринять меры по их устранению до того, как они станут критическими;

б) метод спектрального анализа огибающей высокочастотной вибрации дает возможность определить тип дефекта и его степень развития, что позволяет прогнозировать остаточный ресурс работы;

в) этот метод может применяться для диагностики многих типов оборудования, включая насосы, компрессоры, генераторы, турбины, электродвигатели и др.

К недостаткам метода спектрального анализа огибающей высокочастотной вибрации можно отнести следующие:

а) для использования этого метода необходима тщательная работа по накоплению статистических данных для конкретного оборудования;

б) следует отметить длительность процесса подготовки измерения из-за необходимости точной установки датчика;

в) при удалении от объекта высокочастотная вибрация быстро затухает и по мере развития дефекта переходит в область низкочастотной вибрации.

1.5. Кепстральный анализ

Наличие множества гармонических составляющих основных частот возбуждения при возникновении некоторых дефектов затрудняет обнаружение диагностических признаков при спектральном анализе. Для оценки состояния оборудования используются нелинейные преобразования, такие как логарифмирование спектра с последующим преобразованием Фурье, то есть получение вторичного спектра или кепстра. Существует два метода получения кепстра [6]: применение преобразования Фурье к линейному или логарифмическому спектру. Второй метод обладает наибольшей устойчивостью к помехам⁴. В качестве диагностического при-

⁴ Герике Б.Л., Абрамов И.Л., Герике П.Б. Вибродиагностика горных машин и оборудования : учеб. пособие. Кемерово, КузГТУ, 2007. 167 с.

знака используются амплитуды спектральных компонентов — рахмоник (аналог гармоник спектрального анализа) [7]. Кепстр трансформирует информацию, содержащуюся в спектре и распределенную по всему диапазону частот, в ограниченное число рахмоник кепстра. Кроме того, кепстр нечувствителен к изменениям фазы обрабатываемых сигналов, поэтому кепстры различных агрегатов с одинаковой частотой вращения ротора практически идентичны.

Достоинства метода:

а) кепстральный анализ может быть использован для определения частоты вращения оборудования, что позволяет выявлять неисправности на ранней стадии;

б) этот метод дает возможность выявить и проанализировать сложные вибрационные сигналы, что делает его полезным инструментом для диагностики различных типов оборудования;

в) кепстральный анализ может применяться для определения причин возникновения вибрации, что помогает предотвратить возможные аварии и повреждения оборудования.

К недостаткам можно отнести следующие:

а) кепстральный анализ требует высокой точности и качества данных, что может быть трудно достижимо в некоторых условиях;

б) этот метод может быть достаточно сложным для понимания и использования, что требует от пользователя определенных знаний и навыков;

в) кепстральный анализ не всегда может быть применен к различным типам оборудования, так как он может ограничиваться определенными параметрами и условиями.⁵

1.6. Метод пик-фактора

Данный метод применяется для мониторинга состояния подшипников. Превышение порогового уровня пик-фактора указывает на появление отдельных ударных импульсов, а даль-

нейшее уменьшение этого параметра свидетельствует о возникновении значительного количества ударных импульсов, что представляет опасность для дальнейшей эксплуатации проверяемого объекта. Отношение пиковой амплитуды к среднеквадратическому значению уровня вибрации называется пик-фактором. Это соотношение имеет ярко выраженный максимум на временной шкале.

Достоинства метода пик-фактора:

а) простота и удобство использования;

б) высокая чувствительность к наличию ударных импульсов;

в) может быть использован для мониторинга состояния различных типов подшипников.

Недостатки метода пик-фактора:

а) не позволяет определить причину возникновения ударных импульсов;

б) не всегда позволяет точно определить степень повреждения подшипника;

в) зависимость от частоты вращения оборудования, что может привести к ложным срабатываниям при изменении скорости вращения;

г) не является универсальным методом мониторинга состояния оборудования и должен использоваться в сочетании с другими методами.

1.7. Статистический анализ

Если вибрационный сигнал является случайным процессом, то для его оценки применяются методы статистического анализа. При анализе вибрационных сигналов используется количественная оценка различия параметров реального распределения плотности вероятности от соответствующих параметров нормального закона распределения [8]. Эта оценка основана на четырех основных параметрах: первом начальном моменте (среднем значении), втором, третьем и четвертом центральных моментах распределения [9]. Также используется метод определения пороговых значений для каждого из выбранных параметров вибрации, опреде-

⁵ Барков А. В., Баркова Н. А., Азовцев А. Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации : учебное пособие. Санкт-Петербург : Изд. центр СПб ГМТУ, 2000. 169 с.

ление тенденции изменения определенных параметров. Производится установление статистических связей между компонентами вибрационного сигнала. Редко применяется статистический анализ в практической вибродиагностике, главным образом для оценки отдельных параметров сигнала.

Достоинства:

а) позволяет получить количественную оценку различия параметров реального распределения плотности вероятности от соответствующих параметров нормального закона распределения;

б) дает возможность определить пороговые значения для каждого из выбранных параметров вибрации и выявить тенденции изменения определенных параметров;

в) позволяет установить статистические связи между компонентами вибрационного сигнала.

Недостатки:

а) не всегда применим для анализа сложных сигналов, таких как нестационарные или нелинейные сигналы;

б) требует большого объема данных для получения достоверных результатов;

в) не всегда является эффективным методом для определения конкретной причины возникновения вибрации.

8. Частотная селекция

При диагностике часто бывает недостаточным использование метода анализа общего уровня вибрации или пик-фактора, поэтому применяют частотную селекцию [7] вибродиагностических сигналов, которая позволяет оценивать уровни вибрации в ограниченной полосе частот. Это связано с тем, что появление дефектов может привести к увеличению вибрационных параметров на разных частотах. Кроме того, фильтрация вибросигнала используется для удаления определенных частотных составляющих из исходного сигнала. Для этого применяются различные виды фильтров, такие как фильтры верхних и нижних частот, полосовые гребенчатые и синхронные фильтры. Обычно

выделенная узкая полоса частот подвергается спектральному анализу. Современные средства цифровой фильтрации используются для выделения диагностической информации из высокочастотной вибрации.

Достоинства частотной селекции:

а) позволяет оценивать уровни вибрации в ограниченной полосе частот, что дает возможность выявлять дефекты на разных частотах;

б) позволяет удалить определенные частотные составляющие из исходного сигнала, что может улучшить качество анализа;

в) спектральный анализ выделенной узкой полосы частот может дать более точную информацию о дефекте.

Недостатки метода:

а) ограниченность в выборе полосы частот может привести к тому, что некоторые дефекты могут быть упущены;

б) необходимость использования специальных фильтров может существенно усложнить процесс анализа;

в) в случае неоптимального выбора полосы частот или фильтра может возникнуть искажение результатов анализа.

9. Интеллектуальная диагностика с применением преобразований сигналов и глубоким машинным обучением

Традиционно структура интеллектуальной диагностики неисправностей включает в себя три основных этапа:

- 1) сбор сигнала;
- 2) извлечение и выбор признаков;
- 3) классификацию неисправностей.

На этапе получения сигнала широко использовались вибрационные сигналы, поскольку они предоставляют наиболее достоверную информацию о механических неисправностях. На втором этапе извлечение признаков направлено на извлечение репрезентативных признаков из собранных сигналов на основе методов обработки сигналов, таких как статистический анализ во временной области, спектральный анализ Фурье и вейвлет-преобразование. Хотя эти функции характеризуют механические неис-

правности, они могут содержать бесполезную или нечувствительную информацию и влиять на результаты диагностики, а также на эффективность вычислений. Таким образом, выбор объектов используется для выбора чувствительных объектов с помощью стратегий уменьшения размеров, таких как анализ главных компонентов (РСА), методика оценки расстояния и дискриминантный анализ объектов. На этапе классификации неисправностей выбранные функции используются для обучения методам искусственного интеллекта, таким как k -ближайший сосед (kNN), искусственные нейронные сети и машина опорных векторов (SVM), и с помощью этих методов окончательно определяются механические состояния работоспособности. Например, в [10] использовали улучшенную методику оценки расстояния для выбора шести чувствительных объектов из объектов временной и частотной областей, и эти функции были введены в комплексные адаптивные системы нейро-нечеткого вывода для классификации неисправностей подшипников. В [11] представлен метод классификации неисправностей подшипников, в котором одиннадцать признаков временной и частотной областей использовались для представления различных неисправностей подшипников, а kNN применялся для классификации исправных состояний на основе признаков, выбранных с помощью локальной и нелокальной сохраняющей проекции. В [12] предложена процедура улучшения функций. Для получения надежных функций изображения анализировали спектры вибрации и использовали искусственную нейронную сеть для диагностики неисправностей. Метод вейвлет-спектра был использован для выделения признаков в [13], а усовершенствованный нейро-нечеткий классификатор применялся для классификации состояний носителя.

Можно обнаружить, что было проведено множество исследований по интеллектуальной диагностике неисправностей и достигнуты хорошие результаты. Однако эти исследования могут иметь три следующих недостатка. Во-первых, традиционные методы искусственного ин-

теллекта не способны извлекать и систематизировать различающую информацию непосредственно из необработанных данных. Во-вторых, функции обычно извлекаются и выбираются в соответствии с конкретной диагностической проблемой и, вероятно, не подходят для других проблем. При выполнении новой задачи диагностики может потребоваться переработать алгоритмы извлечения признаков. В-третьих, из-за отсутствия всестороннего понимания механических больших данных часто бывает трудно обеспечить, чтобы извлеченные элементы несли оптимальную информацию для классификации механических неисправностей. Таким образом, диагностам приходится тратить много времени на анализ этих данных и понимание их свойств, что является сложной работой [14].

В [15] предлагается новый интеллектуальный метод диагностики, позволяющий преодолеть два недостатка распространенных интеллектуальных методов диагностики неисправностей при диагностике неисправностей вращающихся механизмов. Новый метод интеллектуальной диагностики сочетает в себе выбор функций и метод DNN. Метод выбора функций основан на расстоянии между элементами для выбора чувствительных элементов. Принцип ее выбора заключается в том, что расстояние между одними и теми же классами является наименьшим, а расстояние между различными классами — наибольшим. Таким образом, уменьшается масштаб нейронной сети и повышается точность классификации. Сначала предварительно выбираются исходные функции, а затем используется оригинальная технология *strong feature* для выбора окончательной надежной функции. Результаты сравнения показывают, что предложенный метод может не только повысить точность, но и сэкономить время работы.

В этом методе разреженная фильтрация адаптивно изучает функции, которые собирают различительную информацию из вибрационных сигналов неконтролируемым способом. Затем функции передаются в *softmax regression* для классификации состояний работоспособности контролируемым образом. Кроме того,

изучается физическая интерпретация весовых векторов — разреженная фильтрация, и эти векторы обладают свойствами, аналогичными свойствам фильтров Габора.

Существует метод диагностики неисправностей с использованием глубокого обучения с подкреплением (DRL — Deep Reinforcement Learning), который предоставляет новые идеи для дальнейшего повышения интеллектуального уровня диагностики неисправностей и обладает потенциалом для решения проблем, связанных с автономным исследованием вибрации. Одним из самых известных и ярких достижений DRL является AlphaGo, первая программа, победившая профессионального игрока-человека в [16].

Для использования DRL была разработана среда моделирования диагностики неисправностей, с помощью которой мы можем преобразовать задачу обучения под наблюдением в задачу обучения с подкреплением. Эту среду можно было бы считать «игрой для диагностики неисправностей». В данном случае под игрой подразумевается процесс, в котором ведется борьба между системой и агентом за получение оптимального результата. Каждая игра содержит определенное количество вопросов для диагностики неисправностей, и каждый вопрос состоит из образца неисправности и соответствующей метки неисправности. Когда агент играет в игру, в игре будет один-единственный вопрос, который агент должен поставить. Затем игра проверит, правильный ли ответ агента. Механизм вознаграждения в игре составляет одно очко за правильный ответ и минус одно очко за неправильный ответ. Когда игра закончится, агент получит общий балл за игру.

Сигнал вибрации вращающегося оборудования содержит достаточную информацию о неисправностях. В качестве критического элемента обучения с подкреплением решающее значение имеет эффективное восприятие окружающей среды и состояния субъектом. Для оригинальных методов обучения с подкреплением, таких как Q-learning, трудно дифференцировать

и идентифицировать состояния вращающихся механизмов, основываясь только на сигналах вибрации, из-за ограниченной способности этих методов представлять состояния. В отличие от методов диагностики неисправностей, основанных на контролируемом обучении, метод, основанный на глубоком обучении с подкреплением, представляет собой комплексное решение, способное проводить автономный анализ нелинейной зависимости между исходными данными о вибрации и соответствующими показателями работоспособности вращающихся механизмов. Такое преимущество может значительно снизить зависимость от экспертного опыта и предварительных знаний при разработке моделей диагностики неисправностей. Таким образом, предлагаемый метод предоставляет идею для реализации более обобщенного интеллектуального решения задач диагностики неисправностей вращающихся механизмов.

Далее рассмотрим метод диагностики неисправностей, основанный на вейвлет-анализе и нейронной сети. Изучением вейвлет в прикладных областях занимались многие исследователи, в том числе и те, кто представлен в [17]. Извлечение признаков неисправности на основе вейвлет-пакета показано в следующем разделе. Вейвлет-преобразование обеспечивает частотно-временное окно, изменяющееся в зависимости от частоты, которое может обеспечить локальный анализ временной (пространственной) частоты. Это может постепенно привести к многомасштабному уточнению сигнала (функции) с помощью операций преобразования и масштабирования и в итоге достичь временного сегмента на высокой частоте и частотного сегмента на низкой частоте, чтобы обеспечить новый метод анализа сигнала, который может автоматически адаптироваться к анализу частотно-временного преобразования.

Вейвлет-нейронная сеть представляет собой иерархическую искусственную нейронную сеть с несколькими решениями, основанную на теории вейвлет-анализа. Она сочетает вейвлет-разложение с нейронной сетью прямой связи

и использует вейвлет-функцию для замены функции скрытого узла традиционной однослойной скрытой нейронной сети, а соответствующие веса и пороговые значения входного уровня для скрытого уровня были заменены параметрами масштабирования и трансляции вейвлет-функции соответственно. Затем устанавливается связь между вейвлет-преобразованием и нейронной сетью с использованием аффинного преобразования.

Система привода редуктора ветряной турбины состоит из шестерни, трансмиссионного вала, подшипника и других компонентов. Сигнал вибрации компонентов будет ненормальным при возникновении неисправности ветряной турбины. Следовательно, выделение сигнала неисправности, содержащего соответствующую частоту, из обычного сигнала вибрации является предпосылкой диагностики неисправности редуктора. Характерная частота сигнала неисправности определяется типом неисправности, частотой вращения и параметрами компонента [18].

Данный подход, сочетающий имитационную модель гидравлической системы с реальными данными, позволил сократить объем необходимых исторических данных без ущерба для гибкости и универсальности модели машинного обучения. Включение всего 0,2 % физических системных данных в обучающий набор данных обеспечило требуемое качество классификации.

Данные, полученные с помощью виртуального моделирования, помогают обучать классификаторы нейронных сетей для систем диагностики и могут сэкономить время и материальные ресурсы. Программное обеспечение SimulationX было использовано для создания имитационной модели гидравлической системы. Предложенный подход к смешиванию экспериментальных и смоделированных данных открывает множество направлений для дальнейших

исследований и усовершенствований. Вычисление оптимального объема ввода реальных данных с учетом распределения данных и уровней шума могло бы стать хорошим научным вопросом, в то время как изучение изменений в модели и влияния гибридного подхода на время, сэкономленное на переподготовке модели в ответ на реконфигурацию аппаратного обеспечения, могло бы приблизить это исследование к использованию в производственной среде на основе концепций цифровых двойников [19].

Преимущества подходов, основанных на данных, заключаются в отсутствии необходимости создавать физические модели машин, а данные о вибрации могут быстро обеспечить раннюю индикацию возникновения неисправности. Диагностика неисправностей вращающихся деталей, полностью основанная на измеренных данных, однако, ограничивается качественными симптомами. Количественная оценка неисправностей, таких как серьезность дисбаланса (местоположение и количество), обычно требует тщательного тестирования установки, которое может занять очень много времени, если вообще возможно.

Основанные на моделях методы, вытекающие из физической модели (полной или частичной) роторных систем, обладают преимуществом более быстрой и точной количественной оценки неисправностей. Кроме того, результаты, полученные с помощью моделей, обычно поддаются физической интерпретации [20].

Недостатки: необходима исходная информация для анализа и тестирования, чтобы сравнить предыдущую и текущую версию состояния машины, при котором возникает ее неисправность [21].

Результаты сравнения методов представлены в табл. 1.

В табл. 2 приведена история развития исследований в области вибродиагностики, основанная на последовательности публикаций.

Таблица 1

Сравнение методов вибрационного контроля и диагностики

Методы	Преимущества	Недостатки
Метод измерения общего уровня шума или вибрации	Простота, экономичность и высокая точность	Невозможность определить источник шума или вибрации, зависимость от окружающей среды и необходимость проведения дополнительных измерений для получения полной картины
Метод ударных импульсов	Высокая чувствительность к зарождающимся дефектам, высокая точность и надежность измерений, широкий диапазон применения	Высокая стоимость оборудования, сложность интерпретации результатов измерений, ограниченность в использовании при высоких частотах
Метод спектрального анализа	Позволяет диагностировать большое количество развитых дефектов и распространен во всех современных средствах анализа вибрации	Возможность анализа только стационарной вибрации, слабая пространственная локализация частотных составляющих, невозможность диагностирования дефектов на ранних стадиях развития
Метод спектрального анализа огибающей высокочастотной вибрации	Возможность обнаружения начинающихся дефектов, определение типа и степени развития дефекта, а также применение для диагностики различных типов оборудования	Необходимость тщательной работы по накоплению статистических данных, длительность процесса подготовки измерения и быстрое затухание высокочастотной вибрации при удалении от объекта
Кепстральный анализ	Позволяет выявлять неисправности на ранней стадии, анализировать сложные сигналы и определять причины возникновения вибрации	Требует высокой точности данных, может быть сложным для использования и не всегда применим к различным типам оборудования
Метод пик-фактора	Простота и удобство использования, высокая чувствительность к наличию ударных импульсов и возможности мониторинга различных типов подшипников	Невозможность определения причины возникновения ударных импульсов, не всегда точное определение степени повреждения подшипника, зависимость от частоты вращения оборудования и необходимость использования в сочетании с другими методами мониторинга
Статистический анализ	Позволяет выявлять аномалии в работе оборудования и предотвращать возможные аварии, дает возможность определить параметры вибрации, которые могут быть связаны с определенными неисправностями, позволяет проводить мониторинг состояния оборудования в режиме реального времени	Не учитывает влияние внешних факторов на вибрационный сигнал, таких как температура, влажность и другие условия эксплуатации, не всегда возможно определить точные границы пороговых значений для каждого параметра вибрации, что может привести к ошибочным выводам, необходимо иметь определенные знания в области статистики и математической обработки данных для правильной интерпретации результатов метода
Частотная селекция	Оценка уровней вибрации на разных частотах и возможность удаления определенных частотных составляющих	Ограниченность в выборе полосы частот и необходимость использования специальных фильтров могут привести к упущению дефектов или искажению результатов анализа
Метод классификации неисправностей по определенному количеству признаков	Позволяет выявить конкретную неисправность в условиях неразрушающего контроля	Функции обычно извлекаются и выбираются в соответствии с конкретной диагностической проблемой и, вероятно, не подходят для других проблем. При выполнении новой задачи диагностики может потребоваться переработка алгоритмов извлечения признаков
Анализ спектра вибрации с помощью искусственных нейросетей	Дефект может быть выявлен на ранних стадиях появления	Традиционные методы искусственного интеллекта не способны извлекать и систематизировать различающую информацию непосредственно из необработанных данных
Анализ вейвлет-спектра	Позволяет локализовать неисправность	Приходится тратить много времени на анализ этих данных и понимание их свойств, что является сложной работой
Метод диагностики с использованием неконтролируемого обучения функциям для обработки больших данных	Снижает зависимость от экспертного опыта, способен анализировать нелинейные зависимости	Для обучения требуется большое количество помеченных данных, т.е. нужен готовый классификатор неисправностей
Интеллектуальная диагностика неисправностей вращающихся механизмов на основе глубокого обучения с выбором функций	Высокая точность при меньшем масштабе нейросети, что приводит к экономии времени на обучение	Требуется большой объем накопленных данных о значениях вибрации и дефектах, также необходим большой экспертный опыт
Диагностика неисправностей с применением вейвлет-нейронной сети	Позволяет локализовать неисправность, определить тип неисправности	Необходимо время для обучения нейросети, накопления данных для формирования классификатора неисправностей
Определение ошибки с помощью сверточного автоэнкодера и частично смоделированных данных	Отсутствие необходимости создавать физические модели машин, возможность собрать большое количество данных о неисправностях, возможность заблаговременного определения неисправности, экономия материальных ресурсов при повышенной точности	Для формирования классификатора требуются первичные данные от физической модели с неисправной подсистемой
Аналитический метод с последующим применением FEM-моделирования	Отсутствие необходимости создавать физические модели машин, возможность собрать большое количество данных о неисправностях	Необходима исходная информация для анализа и тестирования, чтобы сравнить предыдущую и текущую версию состояния машины, при котором возникает ее неисправность

Источники: выполнено А.О. Журавлевым

Table 1

Comparison of vibration monitoring and diagnostics methods

Methods	Advantages	Disadvantages
Method of measuring the total noise or vibration	Level is simple, cost-effective and highly accurate	Inability to determine the source of noise or vibration, dependence on the environment, and the need for additional measurements to get a complete picture
Shock pulse method	High sensitivity to incipient defects, high accuracy and reliability of measurements, wide range of applications	High cost of equipment, complexity of interpretation of measurement results, limited use at high frequencies
The spectral analysis method	Makes it possible to diagnose a large number of developed defects and is widely used in all modern vibration analysis tools	Ability to analyze only stationary vibration, weak spatial localization of frequency components, inability to diagnose defects in the early stages of development
Method of spectral analysis of the envelope of high-frequency vibration	The ability to detect incipient defects, determine the type and degree of defect development, as well as use for diagnostics of various types of equipment	The need for careful work on the accumulation of statistical data, the duration of the measurement preparation process, and the rapid attenuation of high-frequency vibration when moving away from the object
Cepstral analysis	Allows you to detect malfunctions at an early stage, analyze complex signals and determine the causes of vibration	It requires high data accuracy, may be difficult to use, and may not always be applicable to different types of hardware
The peak-factor method	Is simple and easy to use, highly sensitive to the presence of shock pulses and the ability to monitor various types of bearings.	The inability to determine the cause of shock pulses, not always accurate determination of the degree of damage to the bearing, dependence on the speed of rotation of the equipment and the need to use in combination with other monitoring methods
Statistical analysis	Allows you to identify anomalies in the operation of equipment and prevent possible accidents, allows you to determine vibration parameters that may be associated with certain malfunctions, and allows you to monitor the condition of equipment in real time	It does not take into account the influence of external factors on the vibration signal, such as temperature, humidity, and other operating conditions. It is not always possible to determine the exact limits of threshold values for each vibration parameter, which can lead to erroneous conclusions. You must have some knowledge in statistics and mathematical data processing to correctly interpret the results of the method
Frequency selection	Evaluation of vibration levels at different frequencies and the ability to remove certain frequency components	Limited frequency band selection and the need to use special filters can lead to missing defects or distorting the analysis results
The method of classifying faults by a certain number of features	Allows you to identify a specific fault in the conditions of non-destructive testing	Features are usually extracted and selected according to a specific diagnostic problem, and are probably not suitable for other problems. When performing a new diagnostic task, it may be necessary to rework algorithms for extracting features
Analysis of the vibration spectrum using artificial neural	Networks a defect can be detected at an early stage of appearance	Traditional artificial intelligence methods are not able to extract and systematize distinguishing information directly from raw data
Analysis of the wavelet spectrum	Allows you to localize a malfunction	You have to spend a lot of time analyzing this data and understanding their properties what is complex work
A diagnostic method using unsupervised learning of functions for big data processing	Reduces dependence on expert experience, is able to analyze nonlinear dependencies	Training requires a large amount of labeled data, i.e. you need a ready-made fault classifier
Intelligent fault diagnosis of rotating mechanisms based on deep learning with a choice of functions	High accuracy with a smaller neural network scale, which this saves time and training	Requires a large amount of accumulated data on vibration values and defects, as well as extensive expert experience
Fault diagnostics using a wavelet neural network	Allows you to localize the fault, determine the type of fault	It takes time to train the neural network, accumulate data to form a fault classifier
Error detection using a convolutional autoencoder	No need to create physical models of machines, the ability to collect a large amount of fault data, the ability to determine the fault in advance, saving material resources with increased accuracy	The classifier requires primary data from a physical model with a faulty subsystem
Analytical method with subsequent application of FEM modeling	No need to create physical models of machines, the ability to collect a large number of the amount of fault data	You need the initial information for analysis and testing to compare the previous and current version of the machine's state of failure

Source: made by A.O. Zhuravlev

Таблица 2 / Table 2

Исследователи в области вибродиагностики / Researchers in the field of vibration diagnostics

№ / No.	Исследователи / Researchers	Год публикации / Year of publication	Название изучаемого метода / Researchers in the field of vibration diagnostics
1	Худсон Д. / Hudson D.	1970	Статистика для физиков / Statistical analysis
2	Балицкий Ф.Я. / Balitsky F.Ya.	1990	Современные методы и средства вибрационной диагностики машин и конструкций / Modern methods and means of vibration diagnostics of machines and structures [2]
3	Ширман А., Соловьев А. / Shirman A., Solov'ev A.	1996	Метод измерения общего уровня шума или вибрации, кепстральный анализ / Method for measuring the general level of noise or vibration, cepstral analysis [7]
4	Барков А.В. / Barkov A.V.	2000	Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / Vibration monitoring and diagnostics of rotary machines ¹⁾
5	Розенберг Г.Ш. / Rosenberg G.Sh.	2003	Вибродиагностика / Vibration diagnostics [5]
6	Лэй Ю. и др. / Lei Y. et al.	2007	Диагностика неисправностей вращающегося оборудования на основе многократной комбинации ANFIS с газом / Fault diagnosis of rotating machinery based on multiple ANFIS combination with GAs [10]
7	Герике Б.Л. / Guericke B.L.	2007	Вибродиагностика горных машин и оборудования / Vibration diagnostics of mining machinery and equipment ²⁾
8	Баркова Н.А. / Barkova N.A.	2009	Неразрушающий контроль технического состояния горных машин и оборудования / Method for measuring the total level of noise or vibration ³⁾
9	Лю Дж. и др. / Liu J. et al.	2010	Усовершенствованная схема диагностики для контроля состояния подшипников / An enhanced diagnostic scheme for bearing condition monitoring [13]
10	Калинов А.П. / Kalinov A.P.	2012	Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей / Analysis of vibration diagnostics methods for asynchronous motors [3]
11	Ю Д. / Yu D.	2012	Локальная и нелокальная проекция сохранения для классификации дефектов подшипников и оценки эксплуатационных характеристик / Local and Nonlocal Preserving Projection for Bearing Defect Classification and Performance Assessment [11]
12	Амар А., Гондал И., Уилсон К. / Amar M., Gondal I., Wilson C.	2015	Анализ спектра вибрации с помощью искусственных нейросетей / Analysis of the vibration spectrum using artificial neural [12]
13	Лэй Ю. и др. / Lei Yu. et al.	2016	Интеллектуальный метод диагностики неисправностей с использованием неконтролируемого изучения функций на основе больших механических данных / An Intelligent Fault Diagnosis Method Using Unsupervised Feature Learning Towards Mechanical Big Data [14]
14	Сильвер Д. и др. / Silver D. et al.	2016	Освоение игры Го с использованием глубоких нейронных сетей и древовидного поиска / Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search [16]
15	Хуитао С., Шуанси Дж., Сяньхуэй У., Чжиян У. / Huitao C., Shuangxi J., Xianhui W., Zhivang W.	2018	Диагностика неисправностей редуктора ветрогенератора на основе вейвлет-нейронной сети / Fault diagnosis of wind turbine gearbox based on wavelet neural network [18]
16	Хан Д., Лян К., Ши П. / Han D., Liang K., Shi P.	2020	Интеллектуальная диагностика неисправностей вращающихся механизмов на основе глубокого обучения с выбором функций / Intelligent fault diagnosis of rotating machinery based on deep learning with feature selection [15]
17	Гареев А. и др. / Gareev A. et al.	2021	Улучшена диагностика неисправностей в гидравлических системах с помощью стробрируемого сверточного автоэнкодера и частично смоделированных данных / Improved Fault Diagnosis in Hydraulic Systems with Gated Convolutional Autoencoder and Partially Simulated Data [19]
18	Туценко К.О. и др. / Tutsenko K.O. et al.	2022	Применение компьютерных технологий для диагностики заболеваний сердца и легких по данным аускультации / Application of computer technologies for diagnostics of heart and lung diseases based on auscultation data [1]
19	Линь С.Л. и др. / Lin C.-L. et al.	2023	Разработка нового метода мониторинга и диагностики дисбаланса несущих систем ротора на основе моделей / A novel model-based unbalance monitoring and prognostics for rotor-bearing systems [20]

Ending of the Table 2 / Окончание табл. 2

20	Наджи Хадруг Н. и др. / Hadroug N. et al.	2023	Интеллектуальная диагностика неисправностей вибрации турбины с помощью преобразования Фурье и нейро-нечетких систем с использованием вейвлетов / Intelligent faults diagnostics of turbine vibration's via Fourier transform and neuro-fuzzv svstems with wavelets exploitation [23]
21	Подклетнов С. / Podkletnov S.	2023	Применение методов преобразования Фурье и вейвлет-преобразования для вибродиагностики технического состояния тоннельных эскалаторов / Application of Fourier transform and wavelet transform methods for vibration diagnostics of the technical condition of tunnel escalators [22]

Источник: выполнено А.О. Журавлевым /
Source: made by A.O. Zhuravlev

Примечания: ¹⁾Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации : учебное пособие. Санкт-Петербург : Изд. центр СПб ГМТУ, 2000. 169 с.; ²⁾Герике Б.Л., Абрамов И.Л., Герике П.Б. Вибродиагностика горных машин и оборудования : учеб. пособие. Кемерово : КузГТУ, 2007. 167 с.; Баркова Н.А., ³⁾Дорошев Ю.С., Баркова Н.А. Неразрушающий контроль технического состояния горных машин и оборудования : учебное пособие для студентов специальности 150402 «Горные машины и оборудование» вузов региона. Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2009.

Notes: ¹⁾Barkov A.V., Barkova N. A., Azovtsev A. Y. *Vibration monitoring and diagnostics of rotary machines*: a textbook. St. Petersburg: Publishing Center of St. Petersburg State Technical University, 2000. (In Russ.); ²⁾Gericke B.L., Abramov I.L., Gericke P.B. *Vibration diagnostics of mining machinery and equipment*: textbook. stipend. Kemerovo: KuzSTU, 2007. (In Russ.) ISBN: 978-5-89070-581-5 EDN: QMYMGJ; ³⁾Barkova N.A., Doroshev Yu.S., Barkova N.A. *Non-destructive testing of the technical condition of mining machinery and equipment*: a textbook for students of specialty 150402 "Mining machinery and equipment" of universities in the region. Vladivostok: DVG TU Publ.; 2009. (In Russ.) ISBN: 978-5-7596-1135-6 EDN: QMYWEB

3. Результаты

3.1. Анализ представленных методов

Рассмотрев вышеперечисленные методы вибродиагностики, можно заключить, что исследование объекта происходит в три этапа.

1. *Определение способа получения данных о вибрации.* На данном этапе производится выбор датчиков вибрации, места их установки и подключение к первичному преобразователю.

2. *Определение способа обработки полученных данных.* Этот этап подразумевает выбор метода преобразования значений и оцифровки для дальнейшего использования в исследовании.

3. *Определение вида аналитического подхода для получения корректных результатов диагностики.* На этом этапе выбирается способ извлечения объективных данных из полученного по результатам первых двух этапов массива.

Ознакомившись с результатами исследований, можно сказать, что способы получения значений вибрационных величин хорошо известны и распространены. На первом этапе исследования следует стремиться к повышению чувствительности сенсоров и фильтрации шумов, несущих паразитную информацию. На втором этапе основным направлением рассматривается вейвлет-преобразование, позволяющее подробно анализировать полученные данные с возможностью определения дефекта с его локализацией.

Но самым приоритетным направлением на третьем этапе является применение систем машинного обучения и нейросетей. Использование нейросетей в вышеперечисленных исследованиях показало отличные результаты. Недостатком, объединяющим все методы, основанные на применении машинного обучения и нейросетей, является отсутствие большого количества данных о существующих неисправностях, которое требует большого количества трудозатрат для его накопления. Другими словами — нейросеть нечему обучать. Перспективой развития данного направления является сокращение времени на обучение, совершенствование классификатора неисправностей на основе моделирования или на основе физических экспериментов.

В некоторых случаях имеет смысл применение комбинированного метода диагностических исследований, который объединяет несколько видов первичного преобразования вибросигналов. В частности, например, при обследовании текущего состояния газовой турбины или тоннельных эскалаторов [22] используется комплексный подход, в котором используются передовые методы, такие как преобразование Фурье, нейро-нечеткие системы и вейвлет-анализ, для непрерывного мониторинга состояния объекта. Предлагаемый метод начинается со сбора эксплуатационных данных и использования преобразования Фурье для измерения виб-

рациональных величин, точно представляя их эволюцию с помощью спектральных данных, полученных из анализируемых сигналов. Затем для генерации индикаторов отказа турбины используются адаптивные алгоритмы нейро-нечетких систем, основанные на логическом выводе. Этот подход позволяет разработать метод обнаружения неисправностей на основе модели, который сравнивает фактическую работу турбины с расчетной работой, полученной на основе заранее созданной модели, что позволяет классифицировать обнаруженные неисправности. Для повышения качества принятия решений, оценки и проверки эффективности диагностической стратегии применяется многокритериальный анализ на основе вейвлет-преобразования. Представленные результаты различных реализационных и проверочных испытаний демонстрируют эффективность этого интеллектуального диагностического подхода при обнаружении и анализе вибраций газовой турбины [23]. В качестве нового направления развития вибродиагностики предлагается рассмотреть винтовые компрессорные установки, где вращающимся элементом являются геометрически сложные винтовые пары.

Заключение

В рамках проведенного исследования литературных источников на предмет вибрационного анализа производственных и других машин было определено, что развитие методологий определения неисправностей менялось и совершенствовалось вместе с развитием цифровых технологий и систем искусственного интеллекта и машинного обучения. Новые методы вибродиагностики показывают высокую эффективность. Наиболее эффективным представляется вейвлет-преобразование сигналов вибрации.

Благодаря появлению новых методов аналитики, основанной на обработке больших массивов данных, глубокого обучения, искусственного интеллекта, существующие методы вибродиагностики получили значительный толчок к совершенствованию и повышению точности прогнозирования.

Таким образом, исследование нестационарного объекта при помощи вейвлет-преобразования в сочетании с различными видами нейросетей позволит осуществлять самодиагностику вращающихся деталей машин с высокой точностью, что позволит сократить время простоя и повысить производительность оборудования. Тем не менее данный метод имеет свои сильные и слабые стороны, что требует дальнейших исследований для определения оптимальных подходов в различных условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Туценко К.О., Наркевич А.Н., Россиев Д.А., Ипатюк О.В., Авдеев С.М. Применение компьютерных технологий для диагностики заболеваний сердца и лёгких по данным аускультации // *Врач и информационные технологии*. 2022. № 2. С. 12–21. https://doi.org/10.25881/18110193_2022_2_12
2. Балицкий Ф.Я., Генкин М.Д., Иванова М.А., Соколова А.Г., Хомяков Е.И. Современные методы и средства вибрационной диагностики машин и конструкций / Междунар. центр науч. и техн. информ., ИМАШ им. А.А. Благонравова АН СССР. Москва, 1990. Вып. 25. 115 с.
3. Калинов А.П., Браташ О.В. Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2012. № 5. С. 43–51. EDN: TUXPIT
4. Мыцков А.А. Применение метода огибающей для диагностики механических узлов оборудования // *Вибродиагностика. Диагностика*. URL: <http://www.vibration.ru/pmmodmuo/pmmodmuo.shtml> (дата обращения: 01.05.2024).
5. Розенберг Г.Ш., Мадорский Е.З., Голуб Е.С. и др. *Вибродиагностика* / под ред Г.Ш.Розенберга. Санкт-Петербург : ЭИПК, 2003. 284 с.
6. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. Москва : Мир, 1983. Т. 1. 312 с.
7. Ширман А., Соловьев А. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. Москва : Спектр-инжиниринг, 1996. 272 с.
8. Ключев В.В. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / под общ. ред. В.В. Ключева. Т. 7: в 2 кн. Кн. 2: *Вибродиагностика*. Москва : Машиностроение, 2005. 829 с.
9. Худсон Д. Статистика для физиков. Москва : Мир, 1970. 243 с.
10. Lei Y., He Z., Zi Y., Hu Q. Fault diagnosis of rotating machinery based on multiple ANFIS combination with Gas // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2007. Vol. 21. Issue 5. P. 2280–2294. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2006.11.003>

11. Yu J. Local and nonlocal preserving projection for bearing defect classification and performance assessment // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. May 2012. Vol. 59. No. 5. P. 2363–2376. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2167893>
12. Amar M., Gondal I., Wilson C. Vibration Spectrum Imaging: A Novel Bearing Fault Classification Approach // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015. Vol. 62. No. 1 P. 494–502. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2327555>
13. Liu J., Wang W., Golnaraghi F. An enhanced diagnostic scheme for bearing condition monitoring // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2010. Vol. 59. No. 2. P. 309–321.
14. Lei Y., Jia F., Lin J., Xing S., Ding S.X. An Intelligent Fault Diagnosis Method Using Unsupervised Feature Learning Towards Mechanical Big Data // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016. Vol. 63. No. 5. P. 3137–3147. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2519325>
15. Han D., Liang K., Shi P. Intelligent fault diagnosis of rotating machinery based on deep learning with feature selection // *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2020. Vol. 39. No. 4. P. 939–953. <https://doi.org/10.1177/1461348419849279>
16. Silver D., Huang A., Maddison C.J. et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search // *Nature*. 2016. Vol. 529. P. 484–489. <https://doi.org/10.1038/nature16961>
17. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлет-анализ и его приложения. Москва : Физматлит, 2003. 176 с.
18. Huitao C., Shuangxi J., Xianhui W., Zhiyang W. Fault diagnosis of wind turbine gearbox based on wavelet neural network // *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2018. Vol. 37. No. 4. P. 977–986. <https://doi.org/10.1177/1461348418795376>
19. Gareev A., Protsenko V., Stadnik D., Greshnikov P., Yuzifovich Y., Minaev E., Gimadiev A., Nikonorov A. Improved Fault Diagnosis in Hydraulic Systems with Gated Convolutional Autoencoder and Partially Simulated Data // *Sensors*. 2021. Vol. 21. No. 13. P. 4410. <https://doi.org/10.3390/s21134410>
20. Lin C.-L., Liang J.-W., Huang Y.-M., Huang S.-C. A novel model-based unbalance monitoring and prognostics for rotor-bearing systems // *Advances in Mechanical Engineering*. 2023. Vol. 15. No. 1. <https://doi.org/10.1177/16878132221148019>
21. Muszynska A. Vibrational diagnostics of rotating machinery malfunctions illustrated by basic mathematical models of the rotor system // *Rotordynamics*. CRC Press, 2005.
22. Подклетнов С.Г. Применение методов преобразования Фурье и вейвлет-преобразования для вибродиагностики технического состояния тоннельных эскалаторов // *Информатика, вычислительная техника и управление*. 2023. Т. 16. № 5. С. 24–32. <https://doi.org/10.32603/2071-8985-2023-16-5-24-32>
23. Hadroug N., Iratni A., Hafifa A., Colak I. Intelligent faults diagnostics of turbine vibration's via Fourier transform and neuro-fuzzy systems with wavelets exploitation // *Smart Science*. 2023. Vol. 12. P. 155–184. <https://doi.org/10.1080/23080477.2023.2281734>

References

1. Tutsenko KO, Narkevich AN, Rossiev DA, Ipatuk OV, Avdeev SM. Application of computer technologies for diagnostics of heart and lung diseases based on auscultation data. *Doctor and information technologies*. 2022;(2):12–21. (In Russ.) https://doi.org/10.25881/18110193_2022_2_12
2. Balitsky FYa, Genkin MD, Ivanova MA, Sokolova AG, Khomyakov EI. *Modern methods and means of vibration diagnostics of machines and structures*. Int. center of scientific and technical information, IMASH named after A.A. Blagonravov, USSR Academy of Sciences. Moscow; 1990;(25). 115 p. (In Russ.)
3. Kalinov AP, Bratash OV. Analysis of methods of vibration diagnostics of asynchronous motors. *Power engineering. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS*. 2012;5(5). (In Russ.)
4. Myntsov AA. Application of the envelope method for diagnostics of mechanical components of equipment. *Vibration diagnostics. Diagnostics*. (In Russ.) URL: <http://www.vibration.ru/pmodmuo/pmodmuo.shtml>
5. Rosenberg GSh, Madorsky EZ, Golub ES. et al. *Vibration diagnostics*. Rosenberg GSh. (ed.). SPb: EIPK; 2003. (In Russ.)
6. Max J. *Methods and techniques of signal processing in physical measurements*. Moscow: Mir Publ.; 1983. (In Russ.)
7. Shirman A, Soloviev A. *Practical vibration diagnostics and monitoring of the condition of mechanical equipment*. Moscow: Spektr-inzhenering Publ.; 1996. (In Russ.)
8. Klyuev VV. *Non-destructive testing: Handbook in 7 volumes*. Klyuev VV. (ed.). Vol. 7: In 2 books. Book 2: Vibrodiagnostics. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2005. (In Russ.)
9. Hudson D. *Statistics for physicists*. Moscow: Mir Publ.; 1970. (In Russ.)
10. Lei Y, He Z, Zi Y, Hu Q. Fault diagnosis of rotating machinery based on multiple ANFIS combination with GAs. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2007;21(5):2280–2294. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2006.11.003>
11. Yu J. Local and Nonlocal Preserving Projection for Bearing Defect Classification and Performance Assessment. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012; 59(5):2363–2376. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2167893>

12. Amar M, Gondal I, Wilson C. Vibration Spectrum Imaging: A Novel Bearing Fault Classification Approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015;62(1): 494–502. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2327555>
13. Liu J, Wang W, Golnaraghi F. An Enhanced Diagnostic Scheme for Bearing Condition Monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2010; 59(2):309–321. <https://doi.org/10.1109/TIM.2009.2023814>
14. Lei Y, Jia F, Lin J, Xing S, Ding SX. An Intelligent Fault Diagnosis Method Using Unsupervised Feature Learning Towards Mechanical Big Data. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016;63(5):3137–3147. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2519325>
15. Han D, Liang K, Shi P. Intelligent fault diagnosis of rotating machinery based on deep learning with feature selection. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. May 2019;39(4). <https://doi.org/10.1177/1461348419849279>
16. Silver D. et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. *Nature*. 2016;529 (7587):484–489. <https://doi.org/10.1038/nature16961>
17. Koronovskii AA, Khramov AE. *Continuous wavelet analysis and its applications*. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2003. (In Russ.)
18. Huitao C, Shuangxi J, Xianhui W, Zhiyang W. Fault diagnosis of wind turbine gearbox based on wavelet neural network. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, Aug. 2018;37(4): 977–986. <https://doi.org/10.1177/1461348418795376>
19. Gareev A. et al. Improved Fault Diagnosis in Hydraulic Systems with Gated Convolutional Autoencoder and Partially Simulated Data. *Sensors*. 2021;21(13). <https://doi.org/10.3390/s21134410>
20. Lin C-L, Liang J-W, Huang Y-M, Huang S-C. A novel model-based unbalance monitoring and prognostics for rotor-bearing systems. *Advances in Mechanical Engineering*. 2023; <https://doi.org/10.1177/16878132221148019>
21. Muszynska A. Vibrational diagnostics of rotating machinery malfunctions illustrated by basic mathematical models of the rotor system. *Rotordynamics*. CRC Press; 2005.
22. Podkletnov SG. Application of Fourier transform and wavelet transform methods for vibration diagnostics of the technical condition of tunnel escalators. *LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science*. 2023;16(5):4–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.32603/2071-8985-2023-16-5-24-32>
23. Hadroug N, Iratni A, Hafaiya A, Colak I. Intelligent faults diagnostics of turbine vibration's via Fourier transform and neuro-fuzzy systems with wavelets exploitation. *Smart Science*. 2023;12:155–184. (In Russ.) <https://doi.org/10.1080/16168658.2021.1915451>

Сведения об авторах

Журавлев Антон Олегович, аспирант кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 4134-6061, ORCID 0009-0002-2900-6767; e-mail: 1142220875@rudn.ru

Поляков Алексей Олегович, магистрант кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; ORCID: 0009-0001-5511-7551; e-mail: 1032220919@rudn.ru

Андриков Денис Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; доцент кафедры автоматических систем управления, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 8247-7310; ORCID: 0000-0003-0359-0897; e-mail: andrikovdenis@mail.ru

About the authors

Anton O. Zhuravlev, Postgraduate student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 4134-6061; ORCID: 0009-0002-2900-6767; e-mail: 1142220875@rudn.ru

Alexey O. Polyakov, Master's student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; ORCID: 0009-0001-5511-7551; e-mail: 1032220919@rudn.ru

Denis A. Andrikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; Associate Professor of the Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia eLIBRARY SPIN-code: 8247-7310; ORCID: 0000-0003-0359-0897; e-mail: andrikovdenis@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-4-397-404

UDC 629.78

EDN: AAQHWV

Research article / Научная статья

Classification Characteristics of Some Roads in Karbala City

Hayder S. Khudhair^a, Hamid A.E. Al-Jameel^b,
Vladimir N. Konoplev^a✉, Artur R. Asoyan^a

^aRUDN University, *Moscow, Russia*

^bUniversity of Kufa, *Kufa, Iraq*

✉ konoplev-vn@rudn.ru

Article history

Received: July 12, 2024

Revised: September 12, 2024

Accepted: October 14, 2024

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest

Authors' contribution

Undivided co-authorship.

Abstract. A comprehensive understanding of the characteristics of the road network is imperative for implementing fundamental measures to enhance traffic efficiency and mitigate delays. The objective of the present study is twofold: firstly, to classify the urban street network in the city of Karbala; and secondly, to evaluate its effectiveness. Following the delineation of the area of study, traffic data is collected through the utilisation of video imaging technology and subsequently extracted from video files. Following this, the city streets are divided into multiple sections, and the speed of movement in each is calculated, as well as the speed of free flow. The primary objective of this study is to determine and compare the level of service (LOS) of a road based on Highway Capacity Recommendations (HCM 2000), including traffic speed, capacity to assess each segment of the network. The findings of the study revealed that roads of the first category constituted 25% of the total, while roads of the second category comprised 75% of the total. Furthermore, the level of maintenance of street sections is 25% when working with LOS C, 31.25% when working with LOS D, 12.5% when working with LOS E and 31.25% when working with LOS F, according to the assessment of transport operations based on average traffic speed.

Keywords: free flow rate, average speed, throughput, level of road service

Acknowledgement

Authors want to thank the civil department in the faculty of Engineering at Al Kufa university and RUDN University for its contribution in supporting this research and assisting in its implementation.

For citation

Khudhair HS, Al-Jameel HAE, Konoplev VN, Asoyan AR. Classification characteristics of some roads in Karbala city. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(4):397–404. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-397-404>

Классификационные характеристики некоторых дорог в городе Кербела

Х.С. Худхаир^a, Х.А.Э. Аль-Джамиль^b, В.Н. Коноплев^a, А.Р. Асоян^a

^a Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

^b Университет города Куфа, Куфа, Ирак

 konoplev-vn@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 12 июля 2024 г.

Доработана: 12 сентября 2024 г.

Принята к публикации: 14 октября 2024 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

Аннотация. Знание характеристик дорожной сети является важным фактором для принятия основных мер по повышению эффективности дорожного движения и сокращению задержек. Таким образом, целью исследования является классификация и оценка эффективности городской уличной сети в городе Кербела. После определения района исследования данные о дорожном движении собираются с помощью технологии видеоизображения, а затем извлекаются из видеофайлов. После разделения городских улиц на несколько участков была рассчитана скорость движения на всех участках и скорость свободного потока. Основная цель состоит в том, чтобы определить и сравнить уровень дорожного обслуживания (LOS) на основе рекомендаций по пропускной способности автомагистралей (HCM 2000), включая скорость движения, пропускную способность для оценки каждого сегмента сети. Мы обнаружили, что дороги первой категории составляют 25 % от общего количества, в то время как две категории второй категории составляют 75 % от общего количества. А уровень технического обслуживания участков улиц составляет 25 % при работе с LOS C, 31,25 % при работе с LOS D, 12,5 % при работе с LOS E и 31,25 % при работе с LOS F, согласно оценке транспортных операций, основанной на средней скорости движения.

Ключевые слова: свободный поток, средняя скорость, пропускная способность, уровень дорожного обслуживания

Благодарности

Авторы выражают благодарность гражданскому факультету инженерного университета Аль-Куфа и РУДН за их вклад в поддержку этого исследования и за содействие в его реализации.

Для цитирования

Khudhair H.S., Al-Jameel H.A.E., Konoplev V.N., Asoyan A.R. Classification characteristics of some roads in Karbala city // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 4. С. 397–404. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-397-404>

Introduction

Traffic congestion in cities is one of the biggest transportation problems. Traffic jams are very intrusive activities for people and arise owing to the high degree of saturation of traffic flow. Because of the increased trip duration, congestion will have a detrimental effect on drivers and other road users. A population with a wide range of activities leads

to a mobility flow that requires suitable roads [1–5]. The effects of street network design on congestion levels and characteristics differ greatly in street network design [6]. In terms of accidents, delays and CO₂ emissions, the operational efficiency of urban street networks has a significant impact on the sustainability of urban road transport. As a result, governments must regularly inspect road networks and manage urban traffic patterns [7; 8].

The quality of traffic flow must be evaluated to find better solutions to control the increase in traffic demand [9–11]. It is necessary to assess the quality of traffic flow in order to find the best solutions to control the growth in traffic demand [12; 13]. Transportation operations can have both positive and negative effects. Traffic jams in city centers, including Palembang, are one of the undesirable consequences of transport activities. Congestion leads to a significant loss of travel time, which takes a long time and slows down, as well as financial, health and environmental consequences, such as exposure to air pollution caused by car exhaust emissions [14]. According to INRIX, lost time, wasted fuel, and carbon emissions in the 25 cities evaluated in the United States would cost drivers an estimated \$480 billion over the next ten years [15].

The Highway Capacity Manual provides detailed instructions for estimating the capacity and service levels based on speed and other factors. Correction factors for estimating throughput according to various parameters are provided if the HCM handbook does not include lateral friction parameters for determining throughput and service level [16, 17]. With regard to access control, which is considered a key urban traffic issue, statistical correlations between travel speed and related variables have been documented. It is used to measure traffic congestion and quality of services on urban highways. In addition, speed regulation for accessibility purposes has contributed to improving the safety and efficiency of road network [18]. Reliability is one of the most important indicators of transport system efficiency and service quality. The large variance in travel time has become a problem for both travelers and transport management companies. Reliability indicators are increasingly used to assess traffic jams and unexpected changes in travel time [19]. Data from an investigative vehicle for 200 compounds in Beijing, China were analyzed. This study examines urban expressways, auxiliary highways, main roads, and secondary roads. First, the time distributions of the passages of various DOW are studied. The results of tests for compliance with various distributions have shown that a logarithmically normal distribution can provide higher acceptance indicators

for different time periods and types of roads than other distributions. In addition, four reliability indicators (travel time per unit distance, coefficient of variation, buffer time index, and punctuality level) were used to investigate the patterns of travel time variability for various. The results showed that on weekdays, urban expressways, auxiliary roads, and important highways exhibit constant and distinct morning and afternoon peaks [20; 21].

1. Research area

The city of Karbala is a famous city in the Islamic world. It is known for its religious significance. The shrines of Imam Hussein and his brother Abbas can be found in the ancient city or in the city center. It is located approximately 110 km southwest of Baghdad. The study area is located in the center of Karbala Province, where this study examines a group of urban roads connecting central commercial areas with industrial, commercial, residential, and educational areas with high population density. Figure 1 shows the research area where embedded segments and street nodes were identified.

These segments are then displayed. Table 1 lists the main characteristics of the street segments studied, such as the local street name, segment length, and number of lanes. These characteristics were collected in this study based on a field survey.

2. Methodology

Segmenting of urban street. The methodology includes the definition of the study area, which is a network of urban roads in the Karbala province. The primary objective of the fieldwork was to conduct surveys and administer questionnaires on a street-by-street basis to identify the periods of peak traffic. The subsequent step involves the distribution of relevant data. The volume of traffic is determined by recording cameras, whereas the speed information is described by the free flow rate in each network segment. The classes were then determined using the Speed Gun device, and the average speed of movement for each segment in the network was calculated. The appropriate service level (LOS) is then calculated using HCM2000 [22].

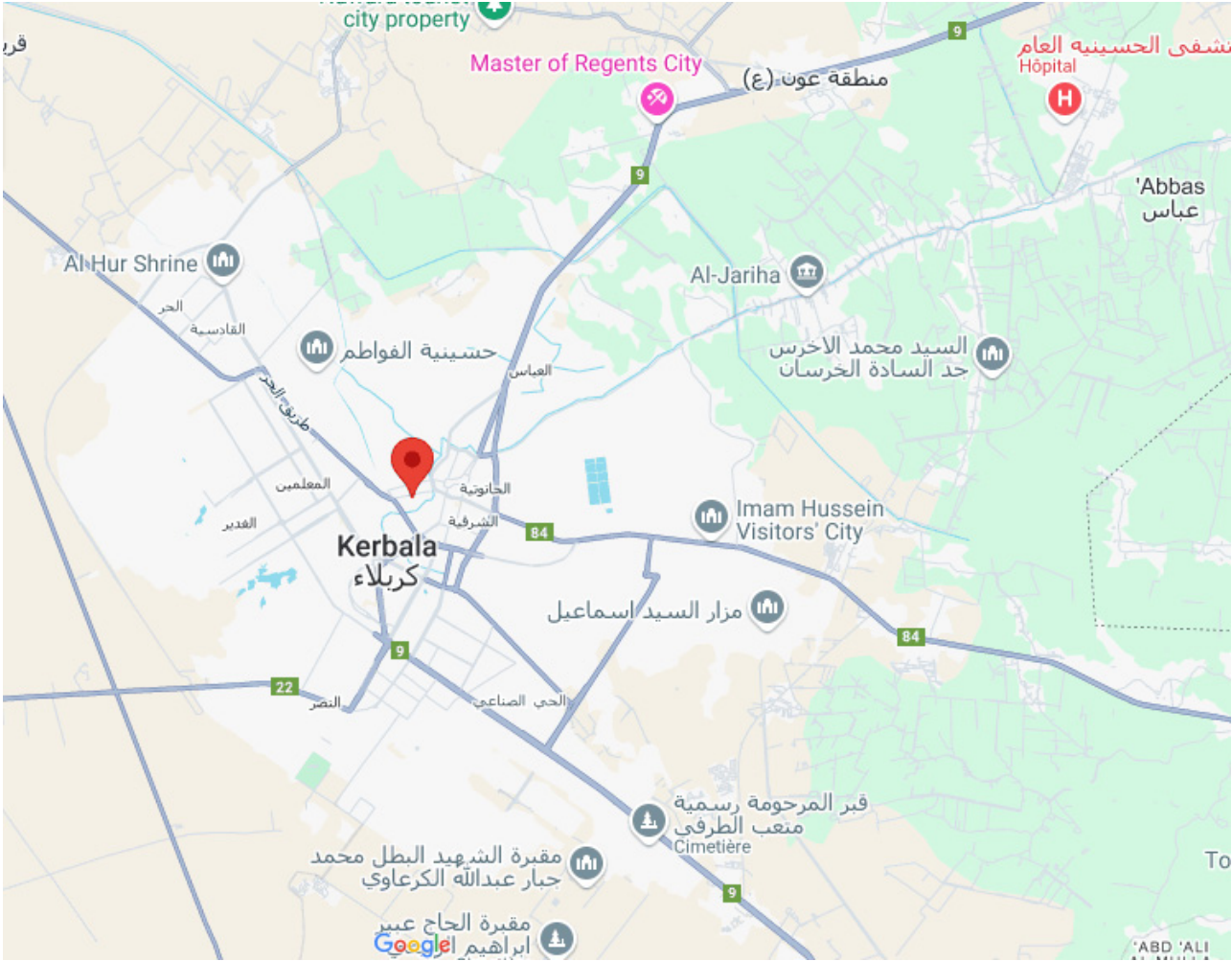


Figure 1. The selected research area

S o u r c e: Karbala Carte, Street Views. Available from:
<https://www.istanbul-visit.com/carte/iraq/karbala-plan.asp> (accessed: 12.06.2024)

Table 1

Detailed information about the roads in the study area

Road Name	Segment NO.	Lane number / direction	Length, m
Fatima Al-Zahraa Street	1	3	234
	2		443
	3		790
	4		811
	5		418
	6		269
Al-Iskan Street	1	3	1430
	2		1380
Ramadan Street	1	3	1670
	2		1710

S o u r c e: make by H.S. Khudhair, H.A.E. Al-Jameel, V.N. Konoplev, A.R. Asoyan

3. Results and discussion

3.1. Determine the road class based on the free flow speed (FFS)

The free-flow speed (FFS) is the average speed of traffic flow when there is not enough traffic to influence drivers' decisions about speed, and when traffic control at an intersection is either absent or located at a distance that does not allow the Speed Gun device to be installed. It is used to determine the FFS, as shown in Figures 3–6.

3.2. Determine the level of service (LOS) of a road

After classifying each segment based on the FFS, city streets were evaluated using the average travel speed (ATS), which is one of the most fundamental indicators of service on city streets. It is calculated by collecting travel time data in the

field. Table 2 illustrates the criteria for urban streets depending on their class and average speed. There are six levels of service, from USA (free work and absolutely free maneuvering) to the USA (congested traffic), when the need for traffic exceeds the capacity of the street (Figure 2) [23].

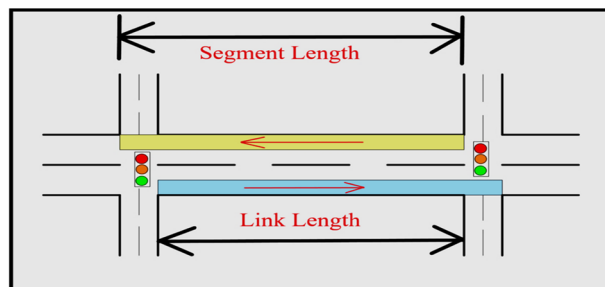


Figure 2. Segment length diagram (adapted from HCM 2010).
Source: Manual HC, HCM2D10 [6]

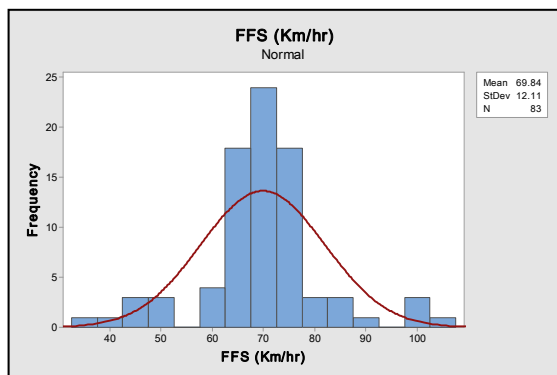


Figure 3. FFS for Fatima Al-Zahraa Street, segments 1, 2, 5, and 6
Source: make by H.S. Khudhair, H.A.E. Al-Jameel, V.N. Konoplev, A.R. Asoyan

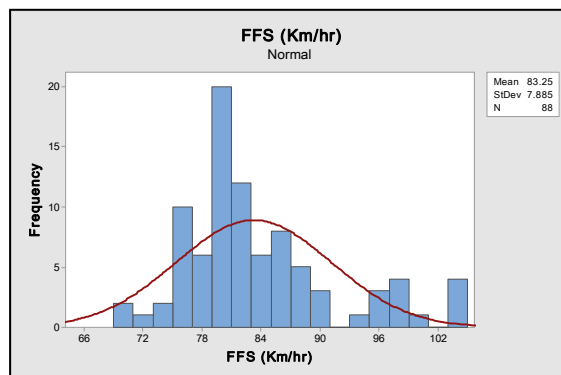


Figure 4. FFS for Fatima Al-Zahraa Street, segments 3 and 4
Source: make by H.S. Khudhair, H.A.E. Al-Jameel, V.N. Konoplev, A.R. Asoyan

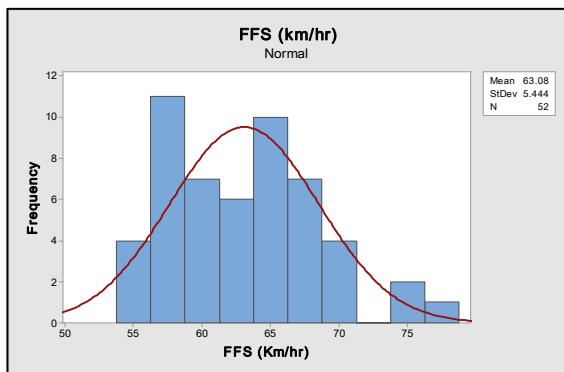


Figure 5. FFS for Al-Iskan street, segment 1 and 2
Source: make by H.S. Khudhair, H.A.E. Al-Jameel, V.N. Konoplev, A.R. Asoyan

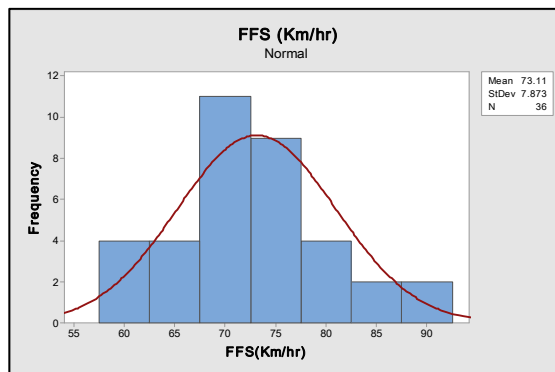


Figure 6. FFS for Ramadan street, segment 1 and 2
Source: make by H.S. Khudhair, H.A.E. Al-Jameel, V.N. Konoplev, A.R. Asoyan

Table 2

LOS of urban road based on FFS and ATS from HCM 2000

Urban street class	I	II	III	IV
Range of FFS, km/h	90 to 70	70 to 55	55 to 50	55 to 40
LOS	Average travel speed (ATS), Km/h			
A	> 72	> 59	> 50	> 41
B	> 56–72	> 46–59	> 39–50	> 32–41
C	> 40–56	> 33–46	> 28–39	> 23–32
D	> 32–40	> 26–33	> 22–28	> 18–23
E	> 26–32	> 21–26	> 17–22	> 14–18
F	≤ 26	≤ 21	≤ 17	≤ 14

Source: make by H.S. Khudhair, H.A.E. Al-Jameel, V.N. Konoplev, A.R. Asoyan

Table 3

LOS according to FFS data (using HCM 2000)

Road name	Seg.no.	FFS, km/hr	Class by FFS	ATS, Km/hr	LOS
Fatima Al- Zahraa Street	1	72.2	I	12	F
	2	58.5	II	24	E
	3	44.6	IV	17	E
	4	43.6	IV	12	F
	5	58.1	II	10	F
	6	67.5	II	16	F
Al-Iskan Street	1	69.6	II	13	F
	2	65.6	II	28	E
Ramadan Street	1	80	I	42	C
	2	78.2	I	26	E

Source: make by H.S. Khudhair, H.A.E. Al-Jameel, V.N. Konoplev, A.R. Asoyan

Conclusions

The analysis of Karbala roads has shown the following:

1. The length of urban roads of the first category is 25% of the total length of the number, and the remaining part of the roads belongs to the second category.

2. The structure of city streets according to the level of maintenance is characterized by 25% when working with LOS C; 31.25% when working with LOS T; 12.5% when working with LOS E; 31.25% when working with LOS Fastidios.

3. The assessment of traffic efficiency by the ratio (o/n) shows that the level of maintenance of street sections is: 50% of the segment's operating

with LOS C; 18.75% of the segments working with LOAD; 25% of the segments working with LOS E; 6.25% of the segments working with LOS F.

4. According to the HCM 2000 methodology, all the considered sections of Fatima Al-Zahra and Al-Iskan streets operate under conditions of traffic disruptions, while Ramadan Street sections operate at their maximum capacity.

References

1. Akbar M., Budianto E, Doloksaribu B. Penentuan Besarnya Tarif Angkutan Dalam Kota (Angkot) Dengan Metode BOK. *Musamus Journal of Civil Engineering*. 2019;1(2):12–15.
2. Mudiyo R, Anindyawati N. Analisis Kinerja Ruas Jalan Majapahit Kota Semarang (Studi Kasus: Segmen

Jalan Depan Kantor Pegadaian Sampai Jembatan Tol Gayamsari). *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Dalam Pengembangan SmartCity*. 2017;1(1):345–354.

3. Afrin T, Yodo N. A survey of road traffic congestion measures towards a sustainable and resilient transportation system. *Sustainability*. 2020;12(11):4660. <https://doi.org/10.3390/su12114660>

4. Mate NR. Indian Road Traffic Congestion Problems, its reasons with focus on Road width. *International Journal for Research Trends and Innovation*. 2022;7(8):4–10.

5. Jing P, Seshadri R, Sakai T, Shamshiripour A, Alho A, Lentzakis AF, Ben-Akiva M. Evaluating congestion pricing schemes using agent-based passenger and freight micro-simulation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2024;186:104118. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104118>

6. Choi D-A, Ewing R. Effect of street network design on traffic congestion and traffic safety. *Journal of transport geography*. 2021;96:103200. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103200>

7. Al Ghanim AMK, Asad FHA, Al-Jameel HAE. Traffic Performance Evaluation for Selected Streets within the Southern Part of Al-Najaf City Network. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1973:012226. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012226>

8. Kareem A, Asad F. Evaluating the operational performance of urban streets within Al-Najaf city. *AIP Conference Proceedings*. 2023;2806:040002. <https://doi.org/10.1063/5.0162784>

9. AL-khazali DF, Al-Jameel HA, Almuhan RR. Investigate traffic characteristics of Kerbala urban streets. *AIP Conference Proceedings*. 2023;2793:070005. <https://doi.org/10.1063/5.0164252>

10. Adanikin A, Ajayi JA, Oyedepo J, Adeoye I, Twaki DL. Traffic Congestion Assessment of Akure Central Business District Using Geographic Information System (GIS). *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*. 2023;21(2):105–110.

11. Hashmi HT, Ud-Din S, Khan MA, Khan JA, Arshad M, Hassan MU. Traffic Flow Optimization at Toll Plaza Using Proactive Deep Learning Strategies. *Infrastructures*. 2024;9(5):87. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9050087>

12. Ewadh HA. Evaluation the traffic operation for arterial highways within hilla city by using hcs. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019;10(05):148–156.

13. Ahmad S, Ali A, Ahmed HU, Huang Y, Lu P. Evaluating traffic operation conditions during wildfire evacuation using connected vehicles data. *Fire*. 2023;6(5):184. <https://doi.org/10.3390/fire6050184>

14. Adha ML, Arliansyah J, Buchari E. Analysis of the Influence of Traffic Flow on Air Pollution at Simpang Angkatan 66 of Palembang City. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1198(8):082005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/8/082005>

15. Atrish AK, Bhugra GS. Traffic Congestion Analysis using PTV VISSIM Software. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2022;10(2):1411–1415. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.40370>

16. *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board Publ.; 2010.

17. Harrou F, Zeroual A, Hittawe MM, Sun Y. *Road Traffic Modeling and Management: Using Statistical Monitoring and Deep Learning*. Elsevier Publ.; 2021. ISBN: 9780128234334

18. Alkaissi AJ, Khaled TT. Travel Speed Prediction Model for Urban Arterial Road and Traffic Management. *Journal of Green Engineering*. 2020;10:13536–13548.

19. Alattar EF, Kadem AJ. Travel time reliability indices for urban routes in Baghdad city. *Journal of Engineering and Sustainable Development*. 2021;25(5):1–14. <https://doi.org/10.31272/jeasd.25.5.1>

20. Chen P, Tong R, Lu G, Wang Yu. Exploring travel time distribution and variability patterns using probe vehicle data: case study in Beijing. *Journal of Advanced Transportation*. 2018;(1959):1–13. <https://doi.org/10.1155/2018/3747632>

21. Alonso E, Arpón C, González M, Fernández RA, Nieto M. Economic impact of autonomous vehicles in Spain. *European Transport Research Review*. 2020;12(1). <https://doi.org/10.1155/2018/3747632>

22. Manual H.C. Highway capacity manual. Washington, DC, 2000;2(1):1.

23. Manual HC. Special report no. 209. Transportation Research Board, Washington DC, USA, 2000.

About the authors

Hayder S. Khudhair, Postgraduate student of the Department of Engineering and Transport Technologies, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; ORCID: 0000-0002-6833-7780; e-mail: hyder.s@uokerbala.edu.iq

Hamid Athab E. Al-Jameel, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kufa, Iraq; ORCID: 0000-0002-1367-4421; e-mail: hamid.aljameel@uokufa.edu.iq

Vladimir N. Konoplev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Engineering and Transport Technologies, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 3876-1534, ORCID: 0000-0003-1662-6254; e-mail: konoplev-vn@rudn.ru

Artur R. Asoyan, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; Professor of the Department of Operation of Road Transport and Car Service, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 1020-5089, ORCID: 0000-0002-1976-9376; e-mail: asoyan-ar@rudn.ru

Сведения об авторах

Худхаир Хайдер Салман, аспирант кафедры техники и технологий транспорта, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; ORCID: 0000-0002-6833-7780; e-mail: hyder.s@uokerbala.edu.iq

Аль-Джамиль Хамид Адаб Идан, доктор технических наук, профессор кафедры гражданского строительства, инженерный факультет, Университет города Куфа, Ирак; ORCID: 0000-0002-1367-4421; e-mail: hamid.aljameel@uokufa.edu.iq

Коноплев Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры техники и технологий транспорта, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 3876-1534, ORCID: 0000-0003-1662-6254; e-mail: konoplev-vn@rudn.ru

Асоян Артур Рафикович, доктор технических наук, профессор департамента транспорта инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; профессор кафедры эксплуатации автомобильного транспорта и автосервиса, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 1020-5089, ORCID: 0000-0002-1976-9376; e-mail: asoyan-ar@rudn.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-4-405-412

УДК 681.5

EDN: ADVUUU

Научная статья / Research article

Исследование математической модели биоискусственной печени с использованием ПИД-регулятора

А.С. Ганьшин[✉], Д.А. Андриков[✉]

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

✉ andrikov-da@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 12 мая 2024 г.

Доработана: 21 июля 2024 г.

Принята к публикации: 25 июля 2024 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии
конфликта интересов.

Аннотация. Цель данного исследования — разработка и анализ математической модели биоискусственной печени с использованием пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора для управления ключевыми процессами. Биоискусственная печень представляет собой сложную систему, задача которой заключается в выполнении основных функций печени, что критически важно для развития альтернативных методов лечения пациентов с печеночной недостаточностью. В работе описано строение и функциональность модели биоискусственной печени, основываясь на обзоре анатомии человеческой печени, а также на изучении биотехнологических аспектов создания искусственных органов. Рассматривается применение ПИД-регулятора, который позволяет точно и адаптивно контролировать процессы внутри модели, такие как подача питательных веществ и удаление токсинов. Методология исследования охватывает создание математической модели, ее компьютерное моделирование и анализ полученных данных. Экспериментальная часть работы заключается в выявлении оптимальных параметров ПИД-регулятора для различных условий эксплуатации биоискусственной печени. Результаты данного исследования могут способствовать повышению эффективности биоискусственных систем поддержки печеночных функций, с их помощью возможно появление и новых подходов к использованию искусственных органов, что обладает значительным потенциалом для сферы трансплантологии и лечения заболеваний печени.

Ключевые слова: пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор, моделирование, глюкоза, биоискусственная поддержка печени, дифференциальные уравнения

Вклад авторов

Ганьшин А.С. — участие в разработке программ и их реализации; написание и доработка текста; Андриков Д.А. — научное руководство, концепция исследования; развитие методологии.



Для цитирования

Ганшин А.С., Андриков Д.А. Исследование математической модели биоискусственной печени с использованием ПИД-регулятора // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 4. С. 405–412. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-405-412>

Investigation of a mathematical model of a bio-artificial liver using a PID-controller

Alexey S. Ganshin^{ORCID}, Denis A. Andrikov^{ORCID}✉

RUDN University, Moscow, Russia

✉ andrikov-da@rudn.ru

Article history

Received: May 12, 2024

Revised: July 21, 2024

Accepted: July 25, 2024

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest

Abstract. The objective of this study is to develop and analyze a mathematical model of a bio-artificial liver using proportional-integral-differential a controller for managing key processes. The bio-artificial liver is a complex system that performs the fundamental functions of the liver, which is of critical importance for the development of alternative treatments for patients with liver failure. The paper describes the structure and functionality of the bio-artificial liver model, based on a review of the anatomy of the human liver, as well as on the study of biotechnological aspects of the creation of artificial organs. The application of a PID-controller is considered, which allows precise and adaptive control of processes within the model, such as the supply of nutrients and the removal of toxins. The research methodology covers the creation of a mathematical model, its computer modeling and analysis of the data obtained. The experimental part of the work is to identify the optimal parameters of the PID-controller for various operating conditions of the bio-artificial liver. The results of this study can contribute to improving the effectiveness of bio-artificial systems for supporting liver functions and offer new approaches to the implementation of artificial organs, which has significant potential for the field of transplantation and treatment of liver diseases.

Keywords: proportional-integral-differential controller, modeling, glucose, bio-artificial liver support, differential equations

Authors' contribution

Ganshin A.S. — participation in the development of programs and their implementation; writing and revision of the text; Andrikov D.A. — scientific management; research concept; methodology development

For citation

Ganshin AS, Andrikov DA. Investigation of a mathematical model of a bio-artificial liver using a PID-controller. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(4):405–412. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-405-412>

Введение

Биоискусственная печень — это инновационное устройство, предназначенное для замены функций печени у людей с печеночной недостаточностью. Это технологическое чудо представляет собой набор клеток печени, размещен-

ных в специальном биореакторе, который способен эффективно функционировать в организме пациента и выполнять основные задачи печени, такие как фильтрация крови, утилизация токсинов и синтез важных белков.

Исследование математической модели биоискусственной печени с использованием — регу-

лятора — это актуальная задача в области биомедицинской инженерии. ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор) — это алгоритм управления, который обеспечивает стабильность и точность работы системы путем сравнения заданного значения с текущим и корректировки управления в соответствии с разницей.

В контексте биоискусственной печени математическая модель является инструментом для оценки и управления ее функционированием. Использование ПИД-регулятора в данном исследовании позволяет оптимизировать работу биоискусственной печени и улучшить результаты ее функционирования в организме пациента [1].

Для проведения исследования математической модели биоискусственной печени с использованием ПИД-регулятора необходимо выполнить следующие шаги:

1. Сбор данных о физиологических параметрах человека с печеночной недостаточностью и о работе реальной печени.

2. Создание математической модели биоискусственной печени, учитывающей основные процессы, происходящие в ней.

3. Программирование ПИД-регулятора для управления биоискусственной печенью и интеграции его с математической моделью.

4. Проведение численных экспериментов с математической моделью и анализ результатов работы ПИД-регулятора.

5. Оптимизация параметров ПИД-регулятора для достижения максимальной эффективности и стабильности работы биоискусственной печени [2].

Интеграция математической модели биоискусственной печени с использованием ПИД-регулятора открывает новые перспективы в области разработки биомедицинских устройств и позволяет улучшить качество жизни пациентов с печеночной недостаточностью. Дальнейшие исследования в этой области могут привести к созданию более эффективных и надежных биоискусственных органов, способных полностью заменить функции естественных органов человека [3].

1. Методы и материалы

1.1. ПИД-регулятор

ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор) — это тип устройства управления, который используется для регулирования процессов и систем с целью поддержания определенного уровня или значения выходного сигнала. ПИД-регулятор состоит из трех основных компонентов — пропорциональной (P), интегральной (I) и дифференциальной (D) составляющих, которые работают вместе для обеспечения стабильности и точности управления [4].

Пропорциональная составляющая отвечает за реакцию системы на текущую ошибку между желаемым и реальным значением, пропорционально этой ошибке. Интегральная составляющая добавляет компенсацию за кумулятивную ошибку во времени, что помогает устранить постоянную ошибку и достичь точного управления в долгосрочной перспективе. Дифференциальная составляющая предназначена для подавления колебаний и установления быстрого и стабильного отклика системы [5].

ПИД-регулятор широко применяется в различных отраслях промышленности, автоматизации и робототехники для управления различными системами, такими как электромоторы, тепловые системы, гидравлические системы, автопилоты, обработка сигналов и др. В современных технологиях он играет важную роль в обеспечении точности, стабильности и оптимальной производительности различных устройств и механизмов [6].

1.2. Использование ПИД-регулятора для математической модели

Математическая модель на основе ПИД-регулятора представляет собой алгоритмическое описание системы управления, который использует пропорционально-интегрально-дифференциальные компоненты для стабилизации и управления процессом или системой. Эта модель включает в себя уравнения и соотношения,

которые связывают входные и выходные переменные системы [7].

Классическое выражение для ПИД-регулятора представляет собой сумму трех компонент:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt},$$

где $U(t)$ — управляющий сигнал на момент времени (t) ; $e(t)$ — ошибка управления на момент времени (t) ; K_p , K_i , K_d — коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной компонент соответственно; (t) — текущий момент времени; (τ) — дополнительная переменная, используемая в интегральной компоненте для указания пределов интегрирования.

Пропорциональная компонента $K_p e(t)$ реагирует на текущую ошибку управления и пропорционально этой ошибке выдает сигнал управления.

Интегральная компонента $K_i e(\tau) d\tau$ вносит корректировку на суммарную ошибку управления за все предыдущие моменты времени, что позволяет устранить постоянную ошибку.

Дифференциальная компонента $K_d \frac{de(t)}{dt}$

учитывает скорость изменения ошибки и позволяет предотвратить резкие скачки и колебания [8; 9].

С использованием этих компонент и их коэффициентов ПИД-регулятор обеспечивает стабильное и точное управление системой или процессом, подстраиваясь под изменения и компенсируя возможные погрешности [9].

Используя данное уравнение, можно провести моделирование и анализ поведения системы при различных значениях коэффициентов ПИД-регулятора. Оптимальная настройка коэффициентов позволяет добиться быстрой реакции системы на изменения входного сигнала, подавления колебаний, уменьшения переходных процессов и повышения стабильности системы [10].

Математическая модель на основе ПИД-регулятора широко применяется в различных областях, таких как промышленная автоматизация, робототехника, электроника, авиация и др., для управления различными процессами и системами. Ее использование позволяет оптимизировать работу устройств, улучшить качество производства, увеличить эффективность и точность управления [11].

1.3. Использование ПИД-регулятора в биоискусственной печени

ПИД-регулятор может быть использован для управления процессами в биоискусственной печени с целью улучшения ее эффективности и стабильности работы. Биоискусственная печень представляет собой устройство, способное заменить функции естественной печени у пациентов с печеночной недостаточностью. Она выполняет задачи фильтрации крови, удаления токсинов и синтеза важных белков [12].

ПИД-регулятор может быть интегрирован в систему управления биоискусственной печенью для автоматической регулировки ее работы. Например, пропорциональная компонента ПИД-регулятора может реагировать на текущий уровень токсинов в крови пациента и корректировать процессы фильтрации и очистки. Интегральная компонента поможет учесть кумулятивную ошибку и выполнить дополнительные регулировки в процессе работы биоискусственной печени. Дифференциальная компонента сможет предотвратить резкие изменения и колебания в процессе функционирования устройства [13].

Использование ПИД-регулятора для биоискусственной печени позволит достичь оптимального управления этим важным медицинским устройством. Автоматическое контролирование процессов в биоискусственной печени с помощью ПИД-регулятора может улучшить качество работы устройства, повысить эффективность его функционирования и обеспечить надежность и стабильность в работе.

1.4. Построение математической модели биоискусственной печени с использованием ПИД-регулятора

Приведенный код (Приложение) представляет собой модель управления уровнем глюкозы в биоискусственной печени с использованием ПИД-регулятора [14].

В этом коде реализуется модель управления уровнем глюкозы в биоискусственной печени с применением ПИД-регулятора. Вначале определяются параметры ПИД-регулятора (пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты), желаемый уровень глюкозы, текущий уровень глюкозы и другие исходные данные [15].

Затем происходит инициализация переменных и запуск цикла моделирования на промежутке времени от 0 до T с заданным шагом интегрирования dt . На каждой итерации цикла рассчитывается ошибка между желаемым и текущим уровнями глюкозы, а затем вычисляются значения пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих управления.

Далее формируется общий выход управления с учетом всех трех составляющих и дозы инсулина. Кроме того, в коде присутствует меха-

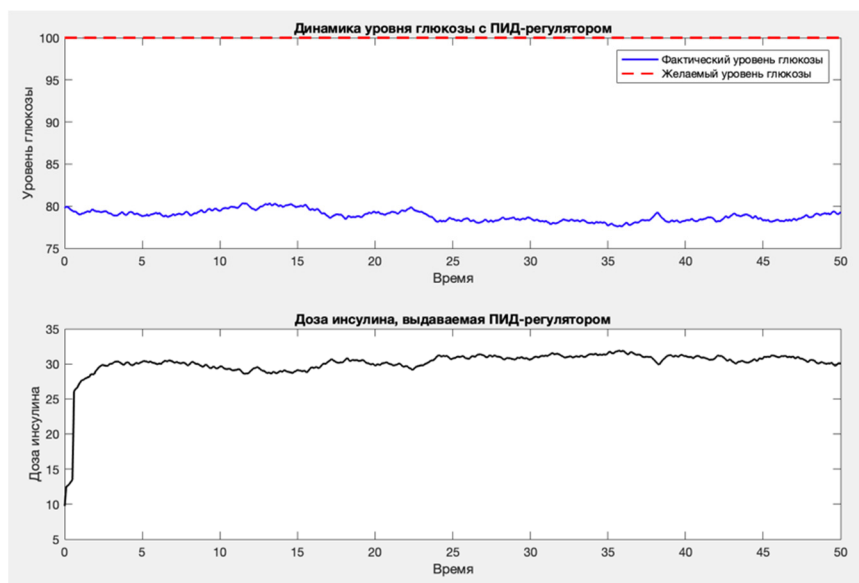
низм обратной связи, который базируется на текущем уровне глюкозы и применяет корректирующую дозу инсулина для улучшения регулирования [16].

Результаты моделирования, такие как значения выхода управления и уровня глюкозы, сохраняются на каждом шаге итерации для последующей визуализации. Таким образом, этот код реализует довольно сложную модель контроля уровня глюкозы с использованием ПИД-регулятора и обратной связи.

Данный код на MATLAB представляет собой модель управления уровнем глюкозы в биоискусственной печени с использованием ПИД-регулятора. Далее более подробно разберем, что происходит в этом коде, а затем рассмотрим, что отображается на графиках (см. рис.).

1. *Параметры ПИД-регулятора*: в начале кода задаются параметры ПИД-регулятора — пропорциональный коэффициент K_p , интегральный коэффициент K_i и дифференциальный коэффициент K_d .

2. *Параметры биоискусственной печени*: задаются параметры, такие как желаемый уровень глюкозы, текущий уровень глюкозы, предыдущий уровень глюкозы и доза инсулина.



Динамика изменения уровня глюкозы, реакция на изменения дозы инсулина

И с т о ч н и к: выполнено А.С. Ганьшиным

Dynamics of changes in glucose levels, reaction to changes in insulin dose

S o u r c e: done by A.S.Ganshin

3. *Исходные данные и переменные*: устанавливаются шаг интегрирования (dt), время моделирования (T) и другие переменные.

4. *Цикл моделирования*: запускается цикл моделирования на заданном временном промежутке. На каждой итерации вычисляется ошибка между желаемым и текущим уровнями глюкозы, а затем рассчитываются значения пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих управления.

5. *Формирование управления и дозы инсулина*: по полученным значениям составляющих управления и дозы инсулина рассчитывается общий выход управления.

6. *Обратная связь*: применяется механизм обратной связи на основе текущего уровня глюкозы для корректировки дозы инсулина.

7. *Графики*: на них отображается динамика изменения уровня глюкозы, выхода управления и других переменных в зависимости от времени, что позволит визуализировать процесс регулирования глюкозы биоискусственной печени.

Поэтому результаты моделирования на графиках дают возможность визуально оценить работу системы управления уровнем глюкозы и ее реакцию на различные параметры и воздействия [17].

Для того чтобы более детально проанализировать графики (см. рис.), следует обратить внимание на следующие аспекты:

1. *Динамика изменения уровня глюкозы*: на графике уровня глюкозы можно увидеть, как ее показатели изменяются в течение времени под воздействием управляющего сигнала ПИД-регулятора. Будет интересно наблюдать, как быстро достигается желаемый уровень глюкозы и как стабильно система удерживает его.

2. *Реакция на изменения дозы инсулина*: при изменении дозы инсулина можно увидеть, как быстро и насколько система реагирует на это изменение. Важно оценить, насколько быстро система достигает нового равновесного состояния после изменения дозы инсулина.

3. *Значения пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих*: на графиках можно посмотреть, какие значения при-

нимают пропорциональная, интегральная и дифференциальная составляющие управления в течение времени. Это позволит понять, как каждая из составляющих влияет на общее управление системой.

4. *Интегральная составляющая и компенсация ошибки управления*: отслеживание изменения интегральной составляющей дает возможность оценить, как система компенсирует накопленную ошибку управления в течение времени.

5. *Скорость реакции системы*: по временной динамике заметно, насколько быстро система реагирует на изменения и корректирует уровень глюкозы путем регулировки дозы инсулина.

Исследование графиков помогает лучше понять работу системы регулирования уровнем глюкозы и оценить ее эффективность и стабильность в контексте различных условий и настроек ПИД-регулятора [18; 19].

Заключение

В ходе настоящего исследования была представлена математическая модель биоискусственной печени, включающая в себя уровень глюкозы и использование ПИД-регулятора для управления этим уровнем. Анализ динамики изменения уровня глюкозы под воздействием управления ПИД-регулятора позволил оценить эффективность и стабильность системы регулирования.

Было выявлено, что настройка параметров ПИД-регулятора имеет значительное влияние на скорость реакции системы, компенсацию ошибки управления и общее качество регулирования. Анализ графиков динамики изменения уровня глюкозы, пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих управления позволил выявить особенности работы системы при различных условиях.

Этот эксперимент подтверждает актуальность использования ПИД-регуляторов в системах биоискусственной печени для поддержания стабильного уровня глюкозы. Дальнейшее исследование может быть направлено на оптимизацию параметров ПИД-регулятора, учет раз-

личных факторов, влияющих на уровень глюкозы, и адаптацию модели к реальным биологическим процессам для более точного моделирования и разработки систем управления.

Исследования и разработки в данном направлении могут привести к созданию более совершенных и жизнеспособных заменителей органов, способных значительно улучшить качество жизни пациентов и повысить эффективность медицинского обслуживания.

Приложение. Параметры ПИД-регулятора

```
% Параметры ПИД-регулятора
Kp = 0.6; % Пропорциональный коэффициент;
Ki = 0.1; % Интегральный коэффициент;
Kd = 0.05; % Дифференциальный коэффициент

% Параметры биоискусственной печени
desired_glucose = 100; % Желаемый уровень глюкозы;
glucose_actual = 80; % Текущий уровень глюкозы;
previous_glucose = 85; % Предыдущий уровень глюкозы;
insulin_dose = 0; % Доза инсулина

% Исходные данные
dt = 0.1; % Шаг интегрирования;
T = 50; % Время моделирования

% Инициализация переменных
error_integral = 0;
output = 0;
feedback_time = 5; % Время для отклика на обратную связь

time_steps = 0:dt:T;
output_values = zeros(size(time_steps));
glucose_values = zeros(size(time_steps));

for idx = 1:length(time_steps)
    % Расчет ошибки
    glucose_actual = glucose_actual + 0.5 * (rand() - 0.5);
    % Моделирование изменения уровня глюкозы
    error = desired_glucose - glucose_actual;
    % Пропорциональная составляющая
    P = Kp * error;
    % Интегральная составляющая с ограничением на накопление ошибки
    error_integral = error_integral + error * dt;
    error_integral = min(max(-50, error_integral), 50);
    % Ограничение на накопление ошибки
    I = Ki * error_integral;
    % Дифференциальная составляющая
    D = Kd * (glucose_actual - previous_glucose) / dt;
    % Выход управления с добавлением обратной связи
    output = P + I + D + insulin_dose;
    output = max(0, output);
    % Не допускаем отрицательной дозы инсулина
    % Фиксация дозы инсулина для обратной связи
    if idx > feedback_time
```

```
insulin_dose = Kp * (desired_glucose - glucose_actual);
% Обратная связь по пропорциональной составляющей
end

output_values(idx) = output;
glucose_values(idx) = glucose_actual;

% Сохранение предыдущего уровня глюкозы
previous_glucose = glucose_actual;
end

% Визуализация результатов
figure;
subplot(2,1,1);
plot(time_steps, glucose_values, 'b-', 'LineWidth', 1.5);
hold on;
plot(time_steps, desired_glucose*ones(size(time_steps)), 'r--', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Время');
ylabel('Уровень глюкозы');
legend('Фактический уровень глюкозы', 'Желаемый уровень глюкозы');
title('Динамика уровня глюкозы с ПИД-регулятором');
hold off;
grid on;

subplot(2,1,2);
plot(time_steps, output_values, 'k-', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Время');
ylabel('Доза инсулина');
title('Доза инсулина, выдаваемая ПИД-регулятором');
grid on
```

References / Список литературы

1. Pereira DS, Pinto JOP. Genetic algorithm based system identification and PID tuning for optimum adaptive control. *Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. 2005; 801–806. <https://doi.org/10.1109/AIM.2005.1511081>
2. Kato M, Yamamoto T, Fujisawa S. A skill based PID controller using artificial neural networks. *International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06)*, Vienna, Austria, 2005. P. 702–707. <https://doi.org/10.1109/CIMCA.2005.1631346>
3. Balis UJ, Yarmush ML, Toner M. Bioartificial Liver Process Monitoring and Control Systems with Integrated Systems Capability. *Tissue Engineering*. 2002;8(3):483–98. <https://doi.org/10.1089/1076327027601847>
4. Wu C, Li K, Zhang C, Zhang G, Huo X. Implementation of Signal Detection and Control of Bioartificial Liver Support System. *BIBE2021: The Fifth International Conference on Biological Information and Biomedical Engineering*. 2021. Article No. 25. <https://doi.org/10.1145/3469678.3469703>
5. He Y-T, Qi Y-N, Zhang B-Q, Li J-B, Bao J. Bio-artificial liver support systems for acute liver failure:

A systematic review and meta-analysis of the clinical and preclinical literature. *World Journal of Gastroenterology*. 2019;25(27):3634–3648. <https://doi.org/10.3748/wjg.v25.i27.3634>

6. Dolgikh MS. The modern technologies for creation of implanted bioartificial liver. *Biochemistry (Moscow), Supplement Series B: Biomedical Chemistry*. 2010;4(2):150–160. <https://doi.org/10.1134/S1990750810020058>

Долгих М.С. Современные технологии создания имплантируемой биоискусственной печени // Биомедицинская химия. 2010. Т. 56. № 4. С. 425–442. (In Russ.) <https://doi.org/10.18097/pbmc20105604425>

7. Pankratov LV. Modeling and optimization of the PID controller. *Science and technology of transport*. 2017; (2):73–78. (In Russ.) EDN: YSPHYB

Панкратов Л.В. Моделирование и оптимизация ПИД-регулятора // Наука и техника транспорта. 2017. № 2. С. 73–78. (In Russ.) EDN: YSPHYB

8. Alexandrov AG, Palenov MV. Adaptive PID controllers: state of the art and development prospects. *Automation and Remote Control*. 2014;75(2):188–199. <https://doi.org/10.1134/S0005117914020027>

Александров А.Г., Паленов М.В. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов // Автоматика и телематика. 2014. № 2. С. 16–30. (In Russ.)

9. Detry O, Arkadopoulos N, Ting P, Kahaku E, Wanabe FD, Rozga J, Demetriou AA. Clinical use of a bioartificial liver in the treatment of acetaminophen-induced fulminant hepatic failure. *American surgeon*. 1999;65(10):934–938. EDN: DEOHDD

10. Ding YT, Shi XL. Bioartificial liver devices: Perspectives on the state of the art. *Frontiers of Medicine*. 2011;5:15–19. <https://doi.org/10.1007/s11684-010-0110-x>

11. Park JK, Lee DH. Bioartificial Liver Systems: Current Status and Future Perspective. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2005;99(4):311–319. <https://doi.org/10.1263/jbb.99.311>

12. Bañares R, Catalina MV, Vaquero J. Molecular adsorbent recirculating system and bioartificial devices for

liver failure. *Clin Liver Dis*. 2014;18(4):945–956. <https://doi.org/10.1016/j.cld.2014.07.011>

13. Cisneros-Garza LE, del Rosario Muñoz-Ramírez M, Muñoz-Espinoza LE. The molecular adsorbent recirculating system as a liver support system: summary of Mexican experience. *Ann Hepatol*. 2014;13(2):240–247. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24552866/>

14. Kanjo A, Ocskay K, Gede N. Efficacy and safety of liver support devices in acute and hyperacute liver failure: a systematic review and network meta-analysis. *Sci Rep*. 2021;11(1):1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83292-z>

15. Hanish SI, Stein DM, Scalea JR. Molecular Adsorbent Recirculating System Effectively Replaces Hepatic Function in Severe Acute Liver Failure. *Ann Surg*. 2017; 266(4):677–684. <https://doi.org/10.1097/sla.00000000000002361>

16. Salman GA, Jafar AS, Ismael AI. Application of artificial intelligence techniques for LFC and AVR systems using PID controller. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2019;10(3):1694. <http://dx.doi.org/10.11591/ijpeds.v10.i3.pp1694-1704>

17. Kouba NY, Menaa M, Hasni M, Boudour M. Optimal Control of Frequency and Voltage Variations Using PID Controller Based on Particle Swarm Optimization. *Proceedings of the 4th International Conference on Systems and Control*. 2015:424–429. <http://dx.doi.org/10.1109/ICoSC.2015.7152777>

18. Tan HK. Molecular adsorbent recirculating system (MARS). *Ann Acad Med Singap*. 2004;33(3):329–335. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15175774/>

19. Khuroo MS, Khuroo MS, Farahat KLC. Molecular adsorbent recirculating system for acute and acute-on-chronic liver failure: a meta-analysis. *Liver Transpl*. 2004; 10(9):1099–1106. <https://doi.org/10.1002/lt.20139>

20. Tandon R, Froghi S. Artificial liver support systems. *J Gastroenterol Hepatol*. 2021;36(5):1164–1179. <https://doi.org/10.1111/jgh.15255>

Сведения об авторах

Ганшин Алексей Сергеевич, аспирант кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; ORCID: 0000-0003-3582-4889; e-mail: 1042210064@pfur.ru

Андриков Денис Анатольевич, кандидат технических наук, доцент департамента механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 8247-7310; ORCID: 0000-0003-0359-0897; e-mail: andrikovdenis@mail.ru

About the authors

Alexey S. Ganshin, Postgraduate student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; ORCID: 0000-0003-3582-4889; e-mail: 1042210064@pfur.ru

Denis A. Andrikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 8247-7310; ORCID: 0000-0003-0359-0897; e-mail: andrikovdenis@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-4-413-426

УДК 623.746.-519

EDN: BSHWDV

Научная статья / Research article

Автоматизированная посадка беспилотного летательного аппарата на подвижную платформу с использованием нейронных сетей

В.А. Суслов^{ID✉}, С.В. Гагарский

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия
✉ vlarsu@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 10 июня 2024 г.

Доработана: 16 августа 2024 г.

Принята к публикации: 10 сентября 2024 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

Аннотация. Разработка беспилотных летательных аппаратов является одним из перспективных направлений для гражданской авиации, которое имеет широкий спектр применения. Нейронные сети могут быть обучены для принятия решений в реальном времени, адаптируясь к изменяющимся условиям на поле боя и обеспечивая оптимальное выполнение поставленных задач. Среди многих задач навигации и управления БПЛА сохраняет актуальность проблема автоматической посадки беспилотного летательного аппарата на подвижную посадочную площадку (корабли, транспортные средства, специализированные площадки). Особую актуальность носит автоматизированная посадка беспилотного летательного аппарата на подвижный носитель. В связи с этим авторами исследуется система автоматической посадки беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на подвижную платформу с использованием нейросетевых технологий. Метод исследования основан на применении искусственных нейронных сетей для разработки адаптивной системы управления, способной принимать решения в реальном времени при выполнении посадочных маневров. В результате разработан алгоритм управления, обеспечивающий точную посадку БПЛА на движущиеся платформы различного типа (корабли, транспортные средства, специализированные площадки), что позволяет существенно расширить радиус действия беспилотных аппаратов и повысить эффективность их применения в различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: приемопередающее устройство, взлетно-посадочная установка, лидар, взлетно-посадочной платформы, нейросеть, подвижный носитель

Для цитирования

Сулов В.А., Гагарский С.В. Автоматизированная посадка беспилотного летательного аппарата на подвижную платформу с использованием нейронных сетей // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 4. С. 413–426. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-413-426>



Automated Landing of an Unmanned Aerial Vehicle on a Mobile Platform Using Neural Networks

Vladislav A. Suslov[✉], Sergey V. Gagarsky

Baltic State Technical University “Voenmeh” named after D.F. Ustinov, *Saint Petersburg, Russia*

✉ vlarsu@mail.ru

Article history

Received: June 10, 2024

Revised: August 16, 2024

Accepted: September 10, 2024

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution

Undivided co-authorship.

Abstract. The development of unmanned aerial vehicles is one of the promising directions for civil aviation with a wide range of applications. Neural networks can be trained for real-time decision making, adapting to changing battlefield conditions and ensuring optimal task execution. Among many UAV navigation and control tasks, the challenge of automatic landing of an unmanned aerial vehicle on a mobile landing platform (ships, vehicles, specialized platforms) remains relevant. Automated landing of an unmanned aerial vehicle on a mobile carrier is particularly significant. The article examines the system of automatic landing of an unmanned aerial vehicle (UAV) on a mobile platform using neural network technologies. The research method is based on the application of artificial neural networks for developing an adaptive control system capable of real-time decision-making during landing maneuvers. As a result of the research, a control algorithm was developed that ensures precise landing of UAVs on various types of moving platforms (ships, vehicles, specialized platforms), which significantly expands the operational range of unmanned vehicles and increases their efficiency in various operating conditions.

Keywords: receiving and transmitting device, runway, lidar, runway, neural network, mobile carrier

For citation

Suslov VA, Gagarsky SV. Automated landing of an unmanned aerial vehicle on a mobile platform using neural networks. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(4):413–426. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-413-426>

Введение

Применение нейронных сетей для автоматизированной посадки беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на подвижную платформу является актуальной задачей. Нейронные сети, обученные на данных о движении платформы и внешних условиях, позволяют адаптироваться к изменениям в реальном времени, обеспечивая надежность операций даже в нестабильных условиях. В таких системах управления нейронные сети обрабатывают данные с сенсоров и камер, включая показатели ветра, перемещения платформы и пространственные параметры, что способствует высокой точности посадки.

Разработка систем автоматической посадки БПЛА на подвижные платформы является ак-

туальным направлением исследований. Анализ научной литературы показывает значительный прогресс в этой оБПЛАсти. Ю.П. Токарев [1] исследовал методы управления БПЛА в общем воздушном пространстве. А.В. Платунова и соавторы [2] рассмотрели особенности формирования адаптивных законов управления. М.Д. Никанорова, Е.В. Заболотская [3] представили численные расчеты аэродинамических характеристик БПЛА.

Применение нейронных сетей для управления БПЛА рассматривается в [4–5]. Особый интерес представляют исследования В.В. Щербинина [6] по алгоритмам корреляционно-экстремальной навигации и работы А.Г. Смольского [7] по нейросетевой обработке геопространственной информации.

Система управления БПЛА состоит из приемопередающих устройств и электронных блоков управления, обеспечивающих точное позиционирование БПЛА на подвижной платформе. Эти системы поддерживают обмен информацией с использованием оптических сенсоров, что позволяет динамично корректировать траекторию для успешной посадки даже при изменяющихся условиях окружающей среды.

Задача точной посадки БПЛА на подвижную платформу требует дальнейшего исследования, особенно в части применения нейронных сетей для обработки данных с оптических сенсоров в реальном времени [8; 9].

Цель исследования — разработка алгоритмов для автоматизированной посадки БПЛА на подвижные носители с использованием нейронных сетей. Данные технологии могут применяться для выполнения задач в удаленных и опасных зонах, снижая зависимость от человеческого вмешательства и повышая безопасность операций.

1. Описание системы автоматической посадки

1.1. Общая структура системы

Предположим, что у нас есть один БПЛА с симметрично расположенными винтами. Также имеется круговая плоская платформа, которая движется в горизонтальной плоскости в пределах обнаружения квадрокоптером. Радиус платформы незначительно превышает расстояние от центра масс до края любого из винтов. Целью является достижение состояния, когда квадрокоптер садится на движущуюся платформу. Решение задачи посадки БПЛА на подвижный носитель включает в себя создание программно-аппаратного комплекса, который содержит подсистему механизации данного процесса и алгоритм управления, реализованный в виде программной части, обеспечивающей работу подсистемы механизации (рис. 1).

Программно-аппаратный комплекс разработан для координации двух управляемых объектов: стола взлетно-посадочной установки

(ВПУ) и беспилотного летательного аппарата. В процессе посадки на движущуюся платформу стол ВПУ может перемещаться независимо от корпуса носителя. Управляемое движение стола обеспечивается электромеханическими приводами, которые стабилизируют платформу по всем шести степеням свободы. Это позволяет компенсировать движение носителя, обеспечивая точную позицию для посадки [10; 11].



Рис. 1. Взаимное расположение БПЛА и ВПУ

Источник: выполнено В.А. Сусловым, С.В. Гагарским

Figure 1. Relative positioning of the Unmanned Aerial Vehicle and the Takeoff and Landing Gear

Source: done by V.A. Suslov, S.V. Gagarsky

Стол взлетно-посадочной установки связан с носителем через подсистему механизации и может двигаться в трехмерной системе координат, следуя кинематической траектории носителя. Движение платформы, как правило, характеризуется случайной составляющей, обусловленной типом носителя: движущееся судно подвержено качке, а автотранспортное средство — неровностям дороги. Подсистема механизации не только сглаживает линейные и угловые колебания, но также синхронизирует движение стола с траекторией БПЛА.

В процессе посадки БПЛА подвергается воздействию внешних сил, таких как порывы ветра и турбулентные потоки, создаваемые движением вокруг стола взлетно-посадочной установки. Эти факторы добавляют случайные коле-

бания в траекторию БПЛА во время захода на посадку, что требует постоянной корректировки его положения и ориентации.

1.2. Приемопередающие устройства

Для точного определения взаимного положения БПЛА и ВПУ на столе и на днище БПЛА устанавливается приемопередающее устройство (ППУ), включающее лидар и матрицу фоторезисторов. Лидар располагается в центре, а фо-

торезисторы образуют концентрические круги вокруг него, фиксируя лазерные лучи, направленные с противоположного устройства [12].

Ось лидара ориентирована перпендикулярно к матрице фоторезисторов. Когда БПЛА входит в зону посадки, лидары и фоторезисторы обоих устройств активируются, регистрируя рассогласование осей лидара, что позволяет вычислить относительное пространственное положение объектов (см. рис. 2).

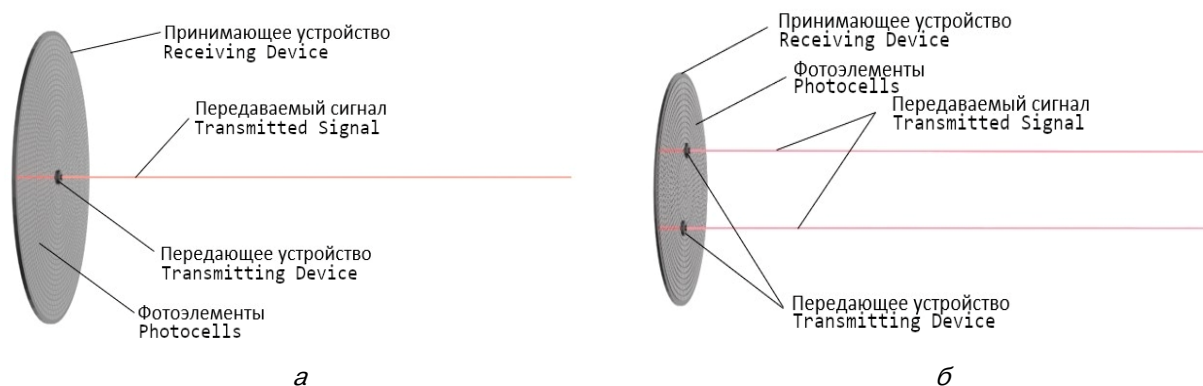


Рис. 2. Состав приемопередающего устройства:

а — взлетно-посадочная установка; *б* — беспилотный летательный аппарат

Источник: выполнено В.А. Сусловым, С.В. Гагарским

Figure 2. Composition of the transceiver unit:

a — Takeoff and Landing Gear; *b* — Unmanned Aerial Vehicle

Source: done by V.A. Suslov, S.V. Gagarsky

Излучатель каждого ППУ передает сигнал на приемник соседнего ППУ. Передаваемый сигнал содержит координаты луча на ЭБУ с точностью дискретизации фоторезисторов, расположенных на панели (рис. 2). Оба сенсорных модуля регистрируют и передают координаты принятого луча на ЭБУ, где происходит расчет относительного положения двух объектов — ВПУ и БПЛА. Дополнительно в центре диска сенсорного модуля ВПУ установлен дальномер, который определяет длину луча от поверхности ВПУ до точки следа на поверхности БПЛА [13; 14].

Для расчетов необходимо учитывать следующие параметры, которые регистрируются и передаются в ЭБУ:

1) две координаты луча от ВПУ на поверхности модуля БПЛА;

2) четыре координаты лучей от БПЛА на поверхности ВПУ (по две координаты на каждый луч);

3) три длины лучей ВПУ и БПЛА.

На основе этих девяти параметров настроенная нейронная сеть определяет шесть координат взаимного положения одного объекта относительно другого.

1.3. Схема системы управления

Специальная сенсорная система (см. рис. 3.) включает несколько устройств.

1. Приемопередающее устройство ВПУ.

2. Приемопередающее устройство БПЛА.

Приемопередающие устройства ВПУ и БПЛА являются ключевыми компонентами системы управления, предназначенными для об-

мена данными в процессе посадки БПЛА на ВПУ. Эти устройства передают и принимают сигналы, содержащие информацию о координатах и ориентации ВПУ относительно БПЛА, что необходимо для точной и безопасной посадки. Приемопередающее устройство ВПУ непрерывно обновляет данные о взаимном положении ВПУ и БПЛА в реальном времени, позволяя системе управления точно рассчитывать коррекции для успешной посадки. Обмен информацией между устройствами осуществляется через оптические сенсорные модули обоих устройств.

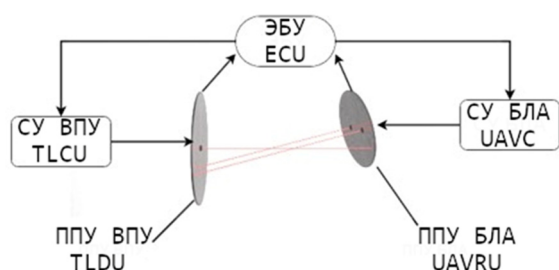


Рис. 3. Состав сенсорной системы

Источник: выполнено В.А. Сусловым, С.В. Гагарским

Figure 3. Composition of the sensor system
Source: done by V.A. Suslov, S.V. Gagarsky

3. Электронный блок управления (ЭБУ) взаимного положения. ЭБУ взаимного положения играет центральную роль в системе управления, координируя действия между ВПУ и БПЛА. Он обрабатывает данные, поступающие от сенсорных модулей и приемопередающих устройств, и управляет движениями обоих объектов для успешного выполнения стыковки. ЭБУ анализирует и интерпретирует данные о шести координатах взаимного положения (три линейных смещения и три угловых поворота на углы Эйлера), которые определяются нейронной сетью на основе информации с оптических сенсоров. Он также рассчитывает необходимые коррекции для точной посадки БПЛА на ВПУ, передает команды системам управления, поддерживая стабильность и безопасность операции.

4. Система управления (СУ) ВПУ.

5. Система управления (СУ) БПЛА.

Системы управления БПЛА и ВПУ отвечают за координацию и управление процессом

посадки БПЛА на ВПУ. СУ БПЛА управляет действиями летательного аппарата, используя данные от сенсоров, включая приемопередающее устройство, для выполнения точных маневров посадки. СУ ВПУ управляет движениями платформы, поддерживая стабильность и координацию для успешного завершения операции. Обе системы управления тесно взаимодействуют, обмениваясь информацией и координируя действия для безопасной и точной посадки БПЛА на ВПУ.

2. Алгоритм расчета геометрии взаимного положения взлетно-посадочной платформы и беспилотного летательного аппарата

Алгоритм расчета взаимного положения ВПУ и БПЛА направлен на точное позиционирование в пространстве для успешной стыковки во время посадки. В процессе используется взаимодействие координатных систем, одна из которых жестко связана с ВПУ, а другая — с БПЛА. Алгоритм реализует расчет геометрии взаимного положения ВПУ и БПЛА с использованием данных от сенсорных модулей [8].

2.1. Структура алгоритма

1. Система сенсоров. Используются два ППУ — одно установлено на ВПУ, другое на БПЛА. Они обмениваются информацией с помощью оптических сенсоров, передавая данные о текущем положении и принимая данные с противоположного устройства.

2. Нейронная сеть для обработки данных. Поступающие данные обрабатываются заранее обученной нейронной сетью, которая преобразует их в шесть координат, включающих три линейных смещения центра тяжести и три угловых поворота (углы Эйлера). Эти координаты поступают в систему управления для корректировки позиции БПЛА.

3. Компоненты ППУ. Каждое ППУ оснащено:

– *передающим устройством* (оптический излучатель) — на БПЛА устанавливаются два

устройства, разнесенных на заданное расстояние, а на ВПУ — одно устройство, расположенное в центре;

– *принимающим устройством* (сенсорная панель с фотодиодами/фоторезисторами) — для регистрации светового сигнала от противоположного ППУ.

4. *Обратная связь и корректировка*. Алгоритм поддерживает обратную связь, что позволяет корректировать взаимное положение для точной стыковки.

2.2. Описание алгоритма

Суть данного алгоритма — в создании обратной связи между двумя управляемыми объектами, что позволяет им динамично реагировать на изменения относительного положения и ориентации в пространстве для точной стыковки. Успех данной процедуры зависит от точности сенсорных систем и эффективности алгоритма управления, который должен быстро и точно рассчитывать необходимые корректирующие маневры для достижения совмещения систем координат для безопасной стыковки БПЛА с ВПУ.

Сбор данных. Сенсорные датчики на ВПУ и БПЛА регистрируют положение лазерного луча, который светит на них с противоположного объекта (например, излучатели на БПЛА направляют лучи на датчики ВПУ, и наоборот).

1. *Анализ регистрации*. По показаниям сенсорных датчиков определяется, на каких координатах (X , Y) каждый из лучей попадает на соответствующую сенсорную панель. Это дает информацию об отклонении относительно идеального положения центров лидаров.

2. *Алгоритм расчета геометрии*. На основе этих данных алгоритм рассчитывает нужное положение и ориентацию ВПУ и БПЛА, чтобы совместить их системы координат так, чтобы оси лидаров обоих объектов совпадали.

3. *Корректирующие маневры*. ВПУ и БПЛА независимо друг от друга выполняют маневры для корректировки своего положения таким образом, чтобы координаты положения следа их

луча на смежном теле совпадали с идеальными координатами на собственном ППУ

4. *Обратная связь и повторение*. После каждого действия данные снова собираются и анализируются для уточнения последующих корректирующих действий. Этот процесс повторяется до тех пор, пока системы координат не совпадут настолько, чтобы обеспечить успешную посадку БПЛА на подвижную платформу в условиях боевых действий.

3. Нейросетевая система управления

Для обучения нейронной сети, использующейся для ориентации положения беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в пространстве, была разработана программа на языке Python с использованием библиотеки Keras. В этой программе используются данные, полученные из имитационной модели, созданной в SolidWorks, включая углы поворота, смещения, координаты излучателей на БПЛА и контрольные замеры.

С помощью этой программы производятся расчеты следов первого и второго излучателей БПЛА на поверхности верхней платформы взлетно-посадочной установки (ВПУ), а также строятся матрицы координат следа излучателя БПЛА на ВПУ.

Использование нейронных сетей для определения ориентации БПЛА в пространстве является более эффективным и целесообразным подходом по сравнению с вычислениями на основе алгоритмов. Это позволяет решать задачи автоматизации полетов беспилотных аппаратов, так как требуется обработка большого объема информации, выполнение множества вычислений, обеспечение автоматической посадки БПЛА и высокой точности посадки.

Для успешного обучения нейронной сети необходимо сгенерировать большое количество вариантов взаимного положения ВПУ и БПЛА в пределах ограничений размеров сенсорной зоны ВПУ и БПЛА по всем девяти координатам пространственного положения. Это обеспечит нейронной сети достаточное разнообразие данных для эффективного обучения и точного определения положения БПЛА в пространстве.

Перед началом работы с нейронными сетями необходимо загрузить данные для обучения модели. В контексте работы над алгоритмом расчета геометрии взаимного положения взлетно-посадочной платформы и беспилотного летательного аппарата данные обычно импортируются из таблицы.

Шаги подготовки данных включают несколько этапов.

1. *Импорт данных из файла*: данные из файла загружаются в переменные X и Y для последующего использования в обучении модели.

2. *Нормализация данных*: каждая характеристика масштабируется и преобразуется таким образом, чтобы находиться в заданном диапазоне обучающей выборки, обычно между нулем и единицей.

Предварительная обработка данных может включать следующие шаги:

1) *заполнение пропущенных значений*: обеспечивает полноту исходных данных;

2) *нормализация данных*: приведение данных к общему масштабу для снижения влияния различных единиц измерения;

3) *удаление выбросов*: исключение некорректных или необычных значений, которые могут исказить результаты модели;

4) *преобразование данных*: приведение данных к необходимому формату для обучения модели, например, преобразование категориальных переменных в числовой формат или использование кодирования с одним активным состоянием для обработки категориальных признаков.

Масштабирование данных играет важную роль в обучении модели машинного обучения, поскольку обеспечивает равномерный вклад всех признаков в процесс обучения, что в конечном итоге может улучшить производительность модели.

Для оценки производительности модели машинного обучения данные обычно разделяют на обучающую и тестовую выборки. Обучающая выборка используется для обучения модели, в то время как тестовая выборка используется для проверки производительности модели на новых, ранее не виденных данных.

После разделения данных на обучающую и тестовую выборки также создается валидационная выборка. Этот подход позволяет оценить производительность модели на независимых от обучающей выборки данных и помогает выявить ее способность обобщать на новые данные.

3.1. Пример разбивки набора данных на тренировочные, тестовые и валидационные (алгоритм расчета геометрии взаимного положения взлетно-посадочной платформы и беспилотного летательного аппарата)

Для создания устойчивой модели нейронной сети данные разделяются на три выборки: тренировочную (70 %), тестовую (15 %) и валидационную (15 %). В Python для этой задачи используется функция `train_test_split` из библиотеки `scikit-learn`:

```
X_train, X_val, X_test, Y_train, Y_val, Y_test = train_test_split(
    X_scale, Y_scale, test_size=0.3, random_state=4)
X_val, X_test, Y_val, Y_test = train_test_split(
    X_val_and_test, Y_val_and_test, test_size=0.5, random_state=4)
```

После разделения данных выполняется нормализация и проверка на репрезентативность. Это необходимо для обеспечения стабильности и качества модели при обработке новых данных.

3.2. Пример построения модели нейронной сети (алгоритм расчета геометрии взаимного положения взлетно-посадочной платформы и беспилотного летательного аппарата)

При работе над алгоритмом используются данные библиотеки класса *Sequential*, который группирует линейный набор слоев в переменную *model*. В данном примере используется следующая архитектура нейронной сети (рис. 4).

1. *Входной слой*: Плотный (Dense) слой с 9 нейронами, соответствующими входным параметрам.

2. *Скрытые слои*:

– первый скрытый слой с 2000 нейронами и функцией активации ReLU;

– второй и третий скрытые слои по 1500 нейронов каждый с ReLU;

– два слоя Dropout для предотвращения переобучения.

3. *Выходной слой*: с 6 нейронами и функцией активации Hard Sigmoid для предсказания 6 параметров.

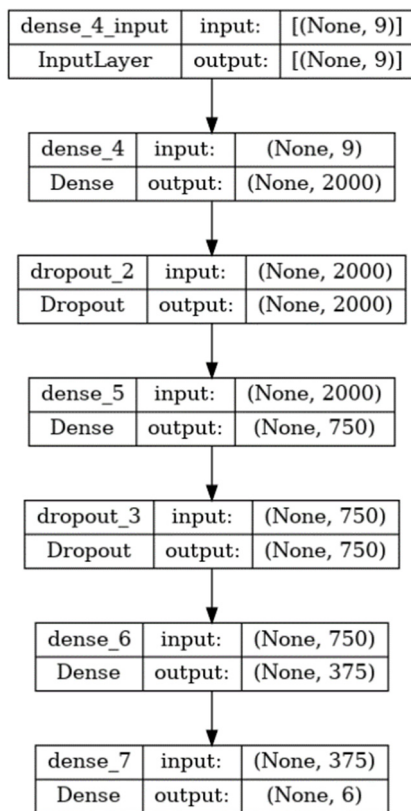


Рис. 4. Схема нейронной сети

Источник: выполнено В.А. Суловым, С.В. Гагарским

Figure 4. Neural network diagram

Source: compiled by V.A. Suslov, S.V. Gagarsky

Эта архитектура нейронной сети может быть эффективной для задачи расчета геометрии взаимного положения взлетно-посадочной платформы и беспилотного летательного аппарата.

3.3. Компиляция модели (сборка и настройка модели для обучения)

После определения архитектуры модели требуется компилировать ее с выбранными параметрами. Компиляция модели включает выбор оптимизатора, функции потерь и метрик для оценки производительности.

```
model.compile(optimizer='adam',
              loss='mse', metrics=['accuracy'])
```

На этом этапе следует выполнить следующие действия:

- выбрать оптимизатор;
- выбрать функцию потерь (loss function);
- выбрать метрику (metrics);
- установить точность (accuracy).

После компиляции модель будет готова для обучения. В процессе обучения модели в библиотеке Keras следует выполнить следующие шаги:

- передать подготовленные данные в модель;
- выбрать количество эпох (*epochs*) и размер пакета (*batch size*);
- выполнить процесс обучения с помощью метода *fit()*.

Перед началом обучения модели важно передать подготовленные данные в метод *fit()*, используя обучающую выборку *x_train* и *y_train*.

3.4. Пример обучения модели нейронной сети (алгоритм расчета геометрии взаимного положения взлетно-посадочной платформы и беспилотного летательного аппарата)

Обучение модели происходит в течение фиксированного количества эпох (итераций на наборе данных), где эпоха представляет собой один полный проход по всей обучающей выборке. Для определения подходящего числа эпох рекомендуется отслеживать метрики производительности модели на валидационной выборке. Размер пакета определяет количество образцов, передаваемых модели за одну итерацию, обычно выбирается так, чтобы обеспечить хорошую скорость обучения и уложиться в доступную память.

В данном случае нейронная сеть обучалась в течение 100 эпох, используя тестовые входные и выходные данные, которые были предварительно получены при разбиении полного набора данных. Объем данных (количество строк), передаваемых модели между вычислениями функции потерь, выбран равным 32.

Процесс обучения включает передачу подготовленных данных в метод *fit()* с указанием

числа эпох и размера пакета. Метод **fit()** обучает модель на протяжении фиксированного числа эпох, обновляя веса с использованием выбранного оптимизатора и минимизируя функцию потерь.

При обучении модели рекомендуется сохранять историю метрик производительности для последующего анализа и визуализации. По завершении обучения модель будет готова для использования в предсказаниях или оценке производительности на новых данных.

Используются переменные **'X_train'** и **'Y_train'** для хранения тренировочных данных, полученных при разбиении исходного набора данных.

Параметры метода **fit()**:

- **batch_size**: количество выборок для обновления градиента;
- **epochs**: количество эпох для обучения модели;
- **validation_data**: данные, используемые для оценки потерь и метрик модели в конце каждой эпохи, но не для обучения модели.

```
hist = model.fit(X_train, Y_train,
                 batch_size=32, epochs=100,
                 validation_data=(X_val, Y_val)).
```

Метод **evaluate()** используется для оценки производительности модели в тестовом режиме. Этот метод возвращает значение потерь (**loss**) и значения выбранных метрик для модели на тестовом наборе данных.

Пример использования метода **evaluate()**:

```
accuracy = model.evaluate(X_test, Y_test)
print('Loss: %.6f' % (accuracy[0]))
print('Accuracy: %.2f%%' % (accuracy[1]*100)),
```

где, **model** — ваша обученная модель, **X_test** — тестовые входные данные, **Y_test** — соответствующие этим данным ожидаемые выходные данные.

После выполнения метода **evaluate()** получим значение потерь модели на тестовом наборе данных, а также значения выбранных вами метрик, которые позволяют оценить производительность модели на новых, ранее не виденных данных.

Когда модель обучена, мы можем сохранить ее для будущего использования или передачи другим. В процессе разработки модели с использованием Keras может возникать необходимость в отладке и улучшении модели для достижения лучших результатов.

Анализ и визуализация результатов помогут вам лучше понять, как ваша модель работает и что может быть улучшено. В Keras вы можете использовать историю обучения, полученную в процессе обучения, для анализа метрик производительности, таких как точность и функция потерь.

3.5. Пример регуляции модели нейронной сети (алгоритм расчета геометрии взаимного положения взлетно-посадочной платформы и беспилотного летательного аппарата)

Перед использованием нейронной сети необходимо провести оценку достоверности результатов вычислений сети на тестовом наборе входных векторов. Для этого следует использовать тестовый набор, компоненты которого отличаются от компонентов набора, использованного для обучения.

Важно обеспечить разнообразие и репрезентативность тестового набора данных, чтобы получить объективную оценку производительности модели. При выборе тестового набора следует учитывать, что он должен содержать данные, которые модель не видела в процессе обучения, чтобы оценить ее способность к обобщению на новые, ранее неизвестные данные.

После проведения тестирования на тестовом наборе данных можно оценить работу модели и принять решение о ее дальнейшем использовании или необходимости дополнительной настройки.

Регуляризация модели нейронной сети может быть полезным методом для предотвращения переобучения и улучшения обобщающей способности модели. Различные методы регуляризации, такие как *L1* и *L2 регуляризация*, *Dropout* и *Batch Normalization*, могут помочь улучшить производительность модели на новых данных и сделать ее более устойчивой к шуму во входных данных.

Дополнительно для оценки производительности модели на тестовом наборе данных можно использовать метрики, такие как точность (*accuracy*), полнота (*recall*), точность (*precision*) и *F1-мера*. Эти метрики помогут оценить качество работы модели и ее способность правильно классифицировать данные.

Важно помнить, что регуляризация и тестирование модели на разнообразных данных являются важными шагами в разработке нейронных сетей, чтобы обеспечить их эффективную работу и способность к обобщению на новые ситуации.

3.6. Проверка модели при помощи тестового набора данных

После выполнения метода `evaluate()` модель возвращает значение потерь и значения выбранных метрик для модели в тестовом режиме. В следующем примере кода:

```
accuracy = model.evaluate(X_test, Y_test)
print('Loss: %.6f' % (accuracy[0]))
print('Accuracy: %.2f%%' % (accuracy[1]*100))
```

Эти числовые значения позволяют оценить, насколько хорошо модель справляется с клас-

сификацией данных. Точность (*accuracy*) указывает на процент правильно классифицированных образцов, а функция потерь (*loss function*) измеряет разницу между предсказанными значениями и фактическими значениями.

Интерпретация точности и функции потерь помогает понять, насколько хорошо модель обучена и насколько точно она делает предсказания. Точность близка к 100 % и указывает на высокую способность модели к правильной классификации данных, а низкое значение функции потерь говорит о том, что модель хорошо соответствует данным.

Эти результаты могут быть использованы для сравнения различных моделей или для оценки улучшений в процессе обучения. Дополнительно визуализация метрик производительности модели на графиках может помочь более наглядно представить ее эффективность и изменения во время обучения. На этом этапе нейросеть возвращает значение потерь и значения показателей для модели в тестовом режиме (рис. 5). При данных настройках нейросеть достигает точности в 98,17 %, а функция потерь выдает результат $7.0177e-06$ (рис. 6).

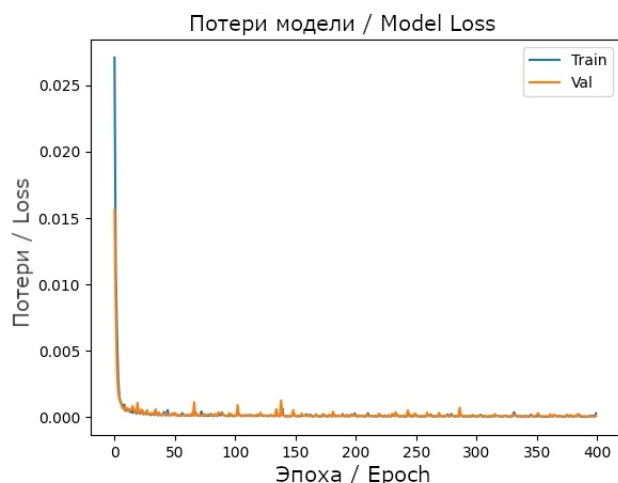


Рис. 5. Потери модели

Источник: выполнено В.А. Сусловым, С.В. Гагарским

Figure 5. Model losses

Source: done by V.A. Suslov, S.V. Gagarsky

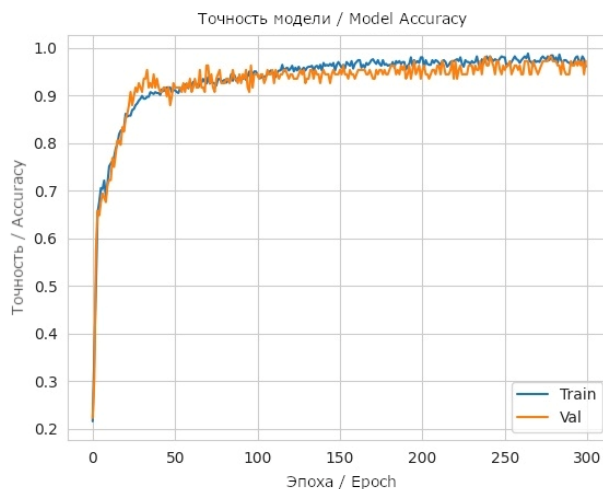


Рис. 6. Точность модели

Источник: выполнено В.А. Сусловым, С.В. Гагарским

Figure 6. Model accuracy

Source: done by V.A. Suslov, S.V. Gagarsky

Для проверки модели используются тестовые входные данные. Полученные предсказанные данные можно сравнить с тестовыми выходными данными, которые являются эталонными. Также можно подавать как одиночные строки с 9 входными данными, так и несколько строк подряд, эмулируя подачу данных на нейронную сеть от управляющего пункта управления ППУ.

При сравнении компонентов эталонных векторов с соответствующими компонентами выходных векторов нейронной сети видно, что почти все точки лежат на прямой, что свидетельствует о правильной работе сети на тестовом наборе данных (рис. 7).

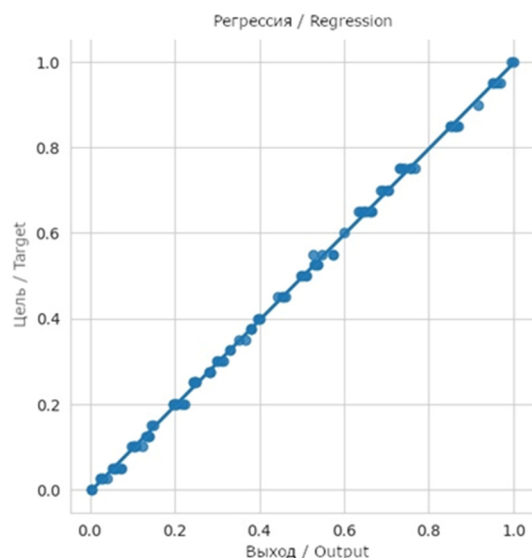


Рис. 7. Регрессия

Источник: выполнено В.А. Сусловым, С.В. Гагарским

Figure 7. Regression

Source: done by V.A. Suslov, S.V. Gagarisky

Рассмотрено несколько распространенных методов сохранения и загрузки модели, таких как регуляризация, сокращение размерности и аугментация данных. Сохранение и загрузка модели являются важными процессами при работе с глубоким обучением. Они позволяют сохранить результаты обучения и использовать модель в других приложениях или продолжить обучение с сохраненной точки.

После того как модель обучена и улучшена в Keras, ее можно сохранить для последующего использования без необходимости повторного обучения. Загруженная модель будет готова к использованию для предсказаний или оценки производительности на новых данных.

Для визуализации процесса обучения и оценки модели представлены графики потерь и точности модели на тренировочном и валидационном наборах данных. Также представлен график регрессии, отображающий соотношение между предсказанными и истинными значениями. Кроме того, приведен пример использования функции **plot_model** из **TensorFlow Keras** для визуализации архитектуры модели.

Все эти шаги помогают не только оценить производительность модели, но и лучше понять ее работу, а также обеспечить возможность последующего использования и дальнейшего улучшения.

4. Результаты исследования

В результате разработки и тестирования нейросетевой системы управления достигнута точность работы системы 98.17 %, что подтверждает высокую эффективность выбранной архитектуры. Получено минимальное значение функции потерь ($7.0177e-06$), свидетельствующее о стабильности обучения.

Реализована оптимальная архитектура нейронной сети с входным слоем (9 нейронов) для обработки данных с сенсоров — тремя скрытыми слоями (2000, 1500, 1500 нейронов) с функцией активации ReLU, двумя слоями Dropout для предотвращения переобучения, выходным слоем (6 нейронов) с функцией активации Hard Sigmoid.

Создан эффективный алгоритм определения взаимного положения БПЛА и платформы, основанный на использовании приемопередающих устройств с лидарами и матрицами фоторезисторов и обработке данных 9 параметров положения для определения 6 координат пространственного положения.

Разработана программно-аппаратная система, включающая механизацию процесса по-

садки, алгоритмы управления на базе нейронных сетей, систему сенсоров для точного позиционирования.

Заключение

Задача точного и плавного опускания БПЛА на подвижную посадочную платформу в условиях боевых действий представляет значительные сложности, даже при наличии современных технологий и систем управления. Это обуславливает необходимость разработки и внедрения передовых технологий, таких как нейронные сети, для повышения эффективности посадочного процесса в условиях реального времени и изменяющихся внешних факторов.

Нейронные сети играют важную роль в автоматизации посадки БПЛА на подвижные платформы, позволяя системе обучаться на широком наборе данных и принимать решения в реальном времени. Адаптируясь к переменам в окружающей среде, нейронные сети учитывают такие факторы, как движение платформы, погодные условия, препятствия и другие параметры, что обеспечивает стабильную и безопасную посадку.

Применение нейронных сетей не только улучшает точность посадки, но и повышает безопасность операции, позволяет быстро реагировать на изменение обстоятельств и улучшает координацию военных действий. Таким образом, нейросетевые технологии в автоматизированной посадке БПЛА способствуют значительному увеличению эффективности и успешности операций, особенно в боевых условиях, где время играет критическую роль. Проведенное исследование подтвердило эффективность применения нейронных сетей для решения задачи автоматической посадки БПЛА на подвижную платформу. Разработанная система демонстрирует высокую точность и надежность, что особенно важно при эксплуатации в сложных условиях.

В работе рассмотрены подходы к автоматическому управлению БПЛА с использованием нейросетевых регуляторов, проанализированы сценарии захода на посадку в условиях верти-

кальных ветровых возмущений и представлены архитектуры нейросетевых регуляторов для управления в продольном канале. Также приведены результаты моделирования и обучения сети, показавшие высокую точность в выполнении двух управленческих законов, обеспечивающих стабильность полета и точность посадки. Дальнейшее совершенствование нейронных сетей и их применение в подобных задачах могут значительно улучшить эффективность и безопасность авиационных операций. Практическая значимость результатов заключается в возможности их применения для повышения эффективности и безопасности операций с использованием БПЛА, особенно в условиях, требующих высокой точности позиционирования.

Список литературы

1. Токарев Ю.П. Методы управления беспилотными летательными аппаратами в общем воздушном пространстве: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.13. Москва, 2022. 168 с.
2. Платунова А.В., Клишин А.Н., Илюхин С.Н. Особенности формирования адаптивных законов управления высокоточными летательными аппаратами // Инженерный вестник. 2016. № 10. С. 5. EDN: XCMРВВ
3. Никанорова М.Д., Заболотская Е.В. Численный расчет аэродинамических характеристик беспилотного летательного аппарата // Политехнический молодежный журнал МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2019. № 4 (33). С. 1–14. <https://doi.org/10.18698/2541-8009-2019-4-464>
4. Кореванов С., Казин В.В. Искусственные нейронные сети в задачах навигации беспилотных летательных аппаратов // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 201. С. 46–49. EDN: RYFUSP
5. Долгов Е.Н. Искусственный интеллект для управления летательными аппаратами // Молодой ученый. 2021. № 16 (358). С. 81–86. EDN: DDХGPE
6. Щербинин В.В., Васильева Ю.С., Чижевская О.М., Шевцова Е.В. Методы функционирования и алгоритмы корреляционно-экстремальной системы навигации летательных аппаратов на основе цветового зрения // Гиропскопия и навигация. 2013. Т. 4, № 1. С. 39–49. <https://doi.org/10.1134/S2075108713010082>
7. Смольский А.Г., Коваленко С.Н., Мухута М.В. Нейросетевой алгоритм обработки геопространственной информации с беспилотного летательного аппарата // Геоинформационные системы военного назначения: теория и практика применения: материалы IX Респ. науч.-практ. конф., Минск, 12 мая 2023 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол. С. 12–16. EDN: ZVCQOK

8. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. Москва : Наука, 2006. 333 с.

9. Гафаров Ф.М., Галимянов А.Ф. Искусственные нейронные сети и приложения : учебное пособие. Казань : КФУ, 2018. 320 с.

10. Сизов А.В., Ипполитов С.В., Савченко А.Ю., Малышев В.А. Способ автономной коррекции инерциальной навигационной системы БПЛА на основе геоинформационных технологий // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7 (1). С. 183–195. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.24.1.030>

11. Иванова И.А., Никонов В.В., Царева А.А. Способы организации управления беспилотными летательными аппаратами // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 11–1. С. 56–63. EDN: TCIQMH

12. Коротин П.С., Алексеев Е.Г. Опыт применения Keras как Front end для tensorflow // Сборник трудов XXIII научно-практической конференции МРСУ. Саранск, 2019. С. 301–306. EDN: KVNIOF

13. Ткачев Н.М., Федяев О.И. Параметрическое описание моделей глубоких нейронных сетей в библиотеке Keras // Программная инженерия: методы и технологии разработки информационно-вычислительных систем. Донецк, 2018. С. 112–118. EDN: ZVPZTL

14. Гагарский С.В., Суслов В.А. Система посадки вертолета на палубу. Санкт-Петербург : Автономные системы, 2022. 95 с.

15. Федосеева Н.А., Загвоздкин М.В. Перспективные ОБПЛАсти применения беспилотных летательных аппаратов // Научный журнал. 2017. Т. 22 (9). С. 26–29. EDN: ZSUMLX

16. Попов А.Н. Методы планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата // Известия СамНЦ РАН. 2017. Т. 19 (1–2). С. 364–370. EDN: ZTPOIN

17. Маммадов А.З. Модель инерциальной навигации для беспилотных летательных аппаратов // Universum: технические науки. 2021. № 5(86). С. 5–9. <https://doi.org/10.32743/UniTech.2021.86.5.11683>

18. Библиотека Keras. URL: <https://keras.io/> (дата обращения: 17.05.2024)

19. Автономная навигационная система. URL: <https://info.wikireading.ru/84077> (дата обращения: 27.04.2024)

20. Сенсоры беспилотников. URL: <https://www.energo-vector.com/energoznanie-kak-robotyorientiruyutsya-v-prostranstve.html> (дата обращения: 27.04.2024)

References

1. Tokarev YuP. *Methods of Controlling Unmanned Aerial Vehicles in Common Airspace Using Flight Information with Automatic Dependent Surveillance*: Ph.D.

thesis in Technical Sciences: 05.22.13. Moscow; 2022. (In Russ.)

2. Platunova AV, Klishin AN, Ilyukhin SN. Features of Forming Adaptive Control Laws for High-Precision Aircraft. *Engineering Bulletin*. 2016;(10):5. (In Russ.) EDN: XCMPBB

3. Nikanorova MD, Zabolotskaya EV. Numerical calculation of aerodynamic characteristics unmanned aerial vehicle. *Politechnical student journal*. 2019;4(33):1–14. <https://doi.org/10.18698/2541-8009-2019-4-464>

4. Korevanov S, Kazin VV. Application of artificial neural networks in problems of general and comparative navigation methods of UAV. *Civil aviation high technologies*. 2014;(201):46–49. (In Russ.) EDN: RYFUSP

5. Dolgov EN. Artificial Intelligence for Aircraft Control. *Young Scientist*. 2021;16(358):81–86. (In Russ.) EDN: DDYGPE

6. Scherbinin VV, Vasil'eva YS, Chizhevskaya OM, Shevtsova EV. Functioning methods and algorithms of color vision-based correlation-extremal aircraft navigation system. *Gyroscopy and Navigation*. 2013;4(1):39–49. <https://doi.org/10.1134/S2075108713010082>

7. Smolsky AG, Kovalenko SN, Mikhuta MV. Neural network algorithm for processing geospatial information from an unmanned aerial vehicle. In: *Geoinformation systems for military purposes: theory and practice of application*. Minsk; 2023. p. 12–16. (In Russ.) EDN: ZVCQOK

8. Makarov IM, Lokhin VM, Manko SV. *Artificial Intelligence and Intelligent Control Systems*. Moscow: Nauka Publ.; 2006. (In Russ.)

9. Gaфаров FM, Galimyanov AF. *Artificial Neural Networks and Applications: Textbook*. Kazan: Kazan Federal University; 2018. (In Russ.)

10. Sizov AV, Ippolitov SV, Savchenko AYU, Malyshev VA. Method of autonomous correction of inertial navigation system of unmanned aircraft on the basis of modern geoinformation technologies. *Modeling, Optimization and Information Technologies*. 2019;7(1):183–195. (In Russ.) <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.24.1.030>

11. Ivanova IA, Nikonov VV, Tsareva AA. Methods of Organizing Control of Unmanned Aerial Vehicles. *Actual problems of the humanities and natural sciences*. 2014;(11–1):56–63. (In Russ.) EDN: TCIQMH

12. Korotin PS, Alekseev EG. The experience of using Keras as a Front end for tensorflow. In: *XXIII scientific and practical conference of National Research Mordovian State University*. Saransk; 2019. p. 301–306. EDN: KVNIOF

13. Tkachev N, Fedyaev O. Parametric description of deep neural network models in the Keras library. In: *Software Engineering: Methods and Technologies*. Donetsk; 2018. p. 112–118. EDN: ZVPZTL

14. Gagarsky SV, Suslov VA. *Helicopter Deck Landing System*. Saint Petersburg: Autonomous Systems LLC; 2022. (In Russ.)

15. Fedoseeva NA, Zagvozdkin MV. Promising Areas of Application of Unmanned Aerial Vehicles. *Scientific Journal*. 2017;22(9):26–29. (In Russ.) EDN: ZSUM LX
16. Popov AN. Planning methods of movement trajectory of unmanned aerial vehicle. *Izvestia of Samara Scientific Center RAS*. 2017;19(1–2):364–370. (In Russ.) EDN: ZTPOIN
17. Mammadov AZ. Model inertial navigation for unmanned aerial vehicles. *Universum: Technical Sciences*. 2021;5(86):5–9. (In Russ.) <https://doi.org/10.32743/UniTech.2021.86.5.11683>
18. *Keras Library*. Available from: <https://keras.io/> (accessed: 17.05.2024).
19. *Autonomous Navigation System*. Available from: <https://info.wikireading.ru/84077> (accessed: 27.04.2024).
20. *UAV Sensors*. Available from: <https://www.energovector.com/energoznanie-kak-roboty-orientiruyutsya-v-prostranstve.html> (accessed: 27.04.2024).

Сведения об авторах:

Сулов Владислав Артемович, аспирант кафедры стартовых и технических комплексов ракет и космических аппаратов, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 2143-8843, ORCID: 0009-0007-1028-5993; e-mail: vlarsu@mail.ru

Гагарский Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры стартовых и технических комплексов ракет и космических аппаратов, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: svgagarski@mail.ru

About the authors

Vladislav A. Suslov, Post-graduate student of the Department of Launch and Technical Complexes of Rockets and Spacecraft, Baltic State Technical University “Voenmeh” named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 2143-8843, ORCID: 0009-0007-1028-5993; e-mail: vlarsu@mail.ru

Sergey V. Gagarsky, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Launch and Technical Complexes of Rockets and Spacecraft, Baltic State Technical University “Voenmeh” named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, Russia; e-mail: svgagarski@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-4-427-440

UDC 629.7.01

EDN: AWOHBR

Research article / Научная статья

Real Time Estimation of the Wind Speed Components Based on Measurement Data from Satellite Navigation and Barometric Measurements

Oleg N. Korsun^{a,b}✉, Mounq Htang Om^b✉

^a State Scientific Research Institute of Aviation Systems, *Moscow, Russia*

^b Moscow Aviation Institute (National Research University), *Moscow, Russia*

✉ marmotto@rambler.ru

Article history

Received: June 27, 2024

Revised: August 30, 2024

Accepted: September 21, 2024

Authors' contribution

The authors have made an equal contribution to data collection and analysis.

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. This research work introduces a robust methodology for estimating three components of wind speed by leveraging airspeed, angle of attack, and sideslip angle measurements from both Satellite Navigation System (SNS) data and on-board sensors. By integrating these diverse sources of information, the proposed algorithm using parametric identification method achieves remarkable accuracy in determining the crucial parameters, i.e. wind speed components, necessary for flight operations. The research was conducted suggesting that the airflow has a constant direction and speed. The estimation of wind speed components is performed for distinct flight duration 20, 31 and 46 seconds in various types of flight maneuver. In order to determine the shortest duration of processing time at which the accurate estimates of three components of wind speed can be ensured, sliding window approach is applied. Notably, this approach yields reliable estimations within an impressive processing time interval of just 0.5 seconds. The findings have significant implications across various domains such as aviation safety enhancement, meteorology applications, and overall operational efficiency improvement of aircraft.

Keywords: parametric identification, flight maneuver, wind speed, angle of attack, sideslip angle, airspeed

Acknowledgements

The authors express their deep appreciation to their teammates for passionate contributions that ensure the completion of this research work. The authors also gratefully acknowledge the helpful comments and suggestions of the reviewers, which literally improve the presentation of the research work.

For citation

Korsun ON, Om MH. Real time estimation of the wind speed components based on measurement data from satellite navigation and barometric measurements. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(4):427–440. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-427-440>

© Korsun O.N., Om M.H., 2024



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

Идентификация скорости ветра в режиме реального времени на основе данных спутниковой навигации и барометрических измерений

О.Н. Корсун ^{a,b}✉, М.Х. Ом ^b✉

^a Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, Москва, Россия

^b Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

✉ marmotto@rambler.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 27 июня 2024 г.

Доработана: 30 августа 2024 г.

Принята к публикации: 21 сентября 2024 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Авторы внесли равноценный вклад в сбор и анализ данных.

Аннотация. Настоящая исследовательская работа посвящена разработке надежного алгоритма оценивания трех проекций скорости ветра на основе измерений воздушной скорости, угла атаки и угла бокового скольжения как по данным спутниковой навигационной системы (СНС), так и по бортовым датчикам. Путем интеграции этих разнообразных источников информации, предложенный алгоритм, использующий метод параметрической идентификации, достигает значительной точности в определении важнейших параметров, то есть проекции скорости ветра, необходимых для выполнения полетов. Исследование проводилось в предположении, что направление и скорость ветра постоянны. Оценивание проекций скорости ветра производился для различных длительностей полета 20, 31 и 46 секунд при различных типах полетного маневра. Для определения наименьшего интервала времени обработки, при котором могут быть получены точные оценки трех проекций скорости ветра, применяется подход скользящего окна. Примечательно, что этот подход позволяет получать надежные оценки за впечатляющий интервал времени обработки, составляющий всего 0,5 секунды. Полученные результаты имеют важное значение для различных областей, таких как повышение безопасности полетов, применение в метеорологии и повышение общей эксплуатационной эффективности воздушных судов.

Ключевые слова: параметрическая идентификация, маневр полета, скорость ветра, угол атаки, угол скольжения, воздушная скорость

Благодарности

Авторы выражают глубокую признательность коллегам по команде за посильный вклад, обеспечивший завершение исследовательской работы. Авторы также выражают признательность рецензентам за полезные комментарии и предложения, которые повысили качество исследовательской работы.

Для цитирования

Korsun O.N., Om M.H. Real time estimation of the wind speed components based on measurement data from satellite navigation and barometric measurements // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 4. С. 427–440. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-427-440>

Introduction

The measurement of atmospheric and aircraft motion parameters is of paramount importance during flight tests [1], flight dynamics [2], and airship design [3]. Wind is also important for numerous specific problems in aerospace, such as

high angle of attack aerodynamics [4; 5], development of a control law for supersonic transport airplanes in the landing phase [6], and engine thrust estimation from flight data [7–9]. Wind velocity should be considered in the detection of dynamic errors in aircraft flight data [10], aircraft flight simulation [11; 12], and cockpit man-machine inter-

face design [13]. To estimate the wind speed components, this study uses system identification methods [14–19]. System identification methods were also applied in [20, 21] for aerodynamic parameter identification. Satellite navigation systems are also used to determine aerodynamic errors in air parameter measurements during flight tests [22].

Generally, the aerodynamic sensors of on-board measurements estimate the so-called local angles of the angle of attack and sideslip angle because of the limitations of sensors in measuring the true angle of attack and sideslip angle. The local angles depend significantly on the characteristics of the aerodynamic flow of the aircraft at the sensor sites. This is the main reason why the angle of attack and the sideslip angle can be obtained from onboard measurements with significant systematic errors. Therefore, information about the true values of the angle of attack and sideslip angle is required to accurately identify the systematic errors of on-board sensors during flight tests.

The estimation of wind speed components can enhance flight safety by providing pilots with up-to-date information to make timely adjustments and enhance overall flight safety, particularly during critical phases such as takeoff and landing. Airlines can also improve operational efficiency by quickly adapting to changing wind conditions, and they can optimize flight paths, reduce delays, and improve operational efficiency. Moreover, in emergencies or adverse weather conditions, real-time wind speed estimation can help pilots navigate safely and make swift decisions to ensure the well-being of passengers and crew. Therefore, the present scientific research work in this paper on the development of an algorithm for the estimation of wind speed components in a short period of flight interval is relevant.

The proposed algorithm provides estimates of the three components of wind speed in a normal earth-fixed axis system, integrating data from a satellite navigation system (SNS) and barometric air measurements. Parametric identification methods were used to estimate the three components of wind speed, and the sliding window approach was applied to determine the shortest processing time

interval. The effect of the airspeed systematic measurement error on the wind speed estimation process was also discussed.

1. Classical method for the estimation of wind speeds during flight test

The determination of the wind speed method has been improved because of the simplicity of determining the actual values of airspeed from ground speed measurements in the modes of horizontal level flight of an aircraft with opposite courses. In addition to the enhancement of a new generation of on-board equipment and satellite technologies, the use of full ratios for calculating airspeed and wind speed was implemented based on measurements of parameters obtained from satellite (SNS) and inertial (INS) navigation systems and air data systems.

The problem for the general case in the horizontal-level flight mode with distinct heading angles was solved in a previous study [23]. It was supposed that in an orthogonal, centering relative to the earth, coordinate system $OXYZ$, the axis of which is normal to the horizon plane, the movement of the aircraft includes the sequential execution of modes of horizontal level flight without sliding with maintaining heading angles, and the corresponding values of airspeed. In this case, the OX axis corresponds to the north in the coordinate system WGS-84. The designations of velocity components on the OX and OZ axes are introduced respectively, with the indices “N” and “E”. Under this assumption, the considered motion, the state of the atmosphere in the area of aircraft flight, is characterized by the constancy of the wind speed vector $U = (U_N, U_E)$, which lies in the plane of the horizon, and the motion itself is characterized by low vertical velocities $V_y : \left| \frac{V_y}{V} \right| \ll 1$. Moreover, the airspeed

direction angles ψ_{1V}, ψ_{2V} do not differ from those of the heading angle ψ_1, ψ_2 . Then, assuming that in the considered horizontal level flight modes, the ground speed vector takes on values $\vec{W}_1 = (W_{N1}, W_{E1})$, $\vec{W}_2 = (W_{N2}, W_{E2})$ accordingly, and

the parameters are measured at the same point in space, the relations are valid for the components of ground speed, air speed and wind speed:

$$\begin{aligned} V_1 \sin \psi_1 + U_E &= W_{E1}; \\ V_2 \sin \psi_2 + U_E &= W_{E2}; \\ V_1 \cos \psi_1 + U_N &= W_{N1}; \\ V_2 \cos \psi_2 + U_N &= W_{N2}; \\ \psi_1 &= \psi_2 + \Delta\psi; \\ V_1 &= V_2 + \Delta V, \end{aligned} \quad (1)$$

where $\Delta\psi = \psi_1 - \psi_2$ is the change in the heading angle when the modes are applied.

When the values of the parameters W_{N1} , W_{E1} , W_{N2} , W_{E2} , $\Delta\psi$, ΔV are known, the system of equations determines the heading angles ψ_1, ψ_2 , the wind speed components U_N, U_E and the airspeeds V_1, V_2 :

$$\begin{aligned} \sin \psi_1 &= \frac{(V_1 - V_2 \cos \Delta\psi) \Delta W_E - \Delta W_N V_2 \sin \Delta\psi}{(\Delta W_N)^2 + (\Delta W_E)^2}; \\ \cos \psi_1 &= \frac{(V_1 - V_2 \cos \Delta\psi) \Delta W_N + \Delta W_E V_2 \sin \Delta\psi}{(\Delta W_N)^2 + (\Delta W_E)^2}; \\ V_1 &= V_2 + \Delta V = \frac{\Delta V}{2} + \sqrt{a + \frac{\Delta V^2}{4}}, \end{aligned} \quad (2)$$

where $\Delta W_N = W_{N1} - W_{N2}$,

$$\begin{aligned} \Delta W_E &= W_{E1} - W_{E2}, a = \frac{(\Delta W_N)^2 + (\Delta W_E)^2 - \Delta V^2}{2(1 - \cos \Delta\psi)}. \\ U_N &= W_{N1} - V_1 \cos \psi_1; \\ U_E &= W_{E1} - V_1 \sin \psi_1. \end{aligned} \quad (3)$$

Otherwise,

$$\begin{aligned} U_N &= \frac{W_{N1} + W_{N2}}{2} - \frac{\Delta W_E \sin(\Delta\psi)}{2(1 - \cos \Delta\psi)} - \\ &\quad - \frac{\Delta V(V_1 + V_2) \Delta W_N}{2((\Delta W_N)^2 + (\Delta W_E)^2)} + \\ &\quad + \frac{(\Delta V)^2 \Delta W_E \sin(\Delta\psi)}{2(1 - \cos \Delta\psi)((\Delta W_N)^2 + (\Delta W_E)^2)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_z &= \frac{W_{E1} + W_{E2}}{2} - \\ &\quad - \frac{\Delta W_N \sin(\Delta\psi)}{2(1 - \cos \Delta\psi)} - \frac{\Delta V(V_1 + V_2) \Delta W_E}{2((\Delta W_N)^2 + (\Delta W_E)^2)} + \\ &\quad + \frac{(\Delta V)^2 \Delta W_N \sin(\Delta\psi)}{2(1 - \cos \Delta\psi)((\Delta W_N)^2 + (\Delta W_E)^2)}. \end{aligned}$$

The determination of wind speed in this method is only an intermediate element in the calculation of airspeed, aerodynamic angles, and other parameters. As in the case of the method described above, the solution to the problem is based on the relationship among the vectors of wind speed $\vec{U}$, ground speeds $\vec{W}$ and airspeeds $\vec{V}$:

$$\vec{U} = \begin{pmatrix} U_N \\ U_E \\ U_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_N \\ W_E \\ W_y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} V_N \\ V_E \\ V_y \end{pmatrix}. \quad (4)$$

To solve Equation (4), measurements of the projection of the ground speed obtained from SNS, the air parameters obtained from the air data system, and the parameters of the angular position of the aircraft in the space obtained from the INS are used. The velocity projections were considered in the WGS-84 coordinate system. Based on Equation (4), when flying without roll and sideslip angles, the components of the wind speed vector are determined by the following expressions:

$$\begin{aligned} U_N &= W_N - V_r \cos \psi; \\ U_E &= W_E - V_r \sin \psi; \\ U_y &= W_y - V_y. \end{aligned} \quad (5)$$

The wind velocity module in the horizontal plane can be expressed as

$$U_r = \sqrt{W_N^2 + W_E^2 + V_r^2 - 2V_r(W_N \cos \psi + W_E \sin \psi)}, \quad (6)$$

where V_r, V_y are horizontal and vertical components of the airspeed; ψ — heading angle.

The method described in this section is fundamental for determining the actual values of

the air parameters using the SNS. The results obtained demonstrate the possibility of reducing the errors in determining the atmospheric and flight parameters in flight tests of aircraft and on-board equipment. Despite the current use of the proposed methods in flight tests [23], this method can only be applied when the aircraft maintains its horizontal-level flight without sideslip angles. In addition, it uses airspeed and groundspeed measurements only, and does not use the measurements of the angles of attack and sideslip.

The following publications confirm this conclusion. In [24], wind speed components were estimated using the ground speed derived from GPS position measurements, true airspeed or calibrated airspeed, and pressure altitude. In [25], an interactive procedure was proposed to extract the wind from trajectory data. In this procedure, a human operator selects appropriate subsets of radar data, performs automatic and/or manual curve fitting to extract the wind data, and validates the resulting wind estimates. Wind speed estimation can also be performed using trajectory parameters such as airspeed, initial heading, turn rate, and flight path angle, as aircraft motion depends on these parameters [26] and flight path data [27]. In these studies, wind estimation was based on trajectory parameters, and only two horizontal components were estimated. Kalman filter estimation can also be applied for the estimation of wind speed using airspeed and ground speed [28; 29].

In all the above-reviewed cases, the data from the angles of attack and sideslip angle considered in this present scientific research work were not used for the estimation of wind speed. Normally, the sensors installed in the aircraft are used to collect atmospheric information such as latitude, longitude, and air pressure, and wind estimations, that is, wind speed and wind direction, are drawn from trajectory parameters.

Therefore, a method for the estimation of three components of wind speed using the angle of attack, sideslip angle, and airspeed is proposed in this paper, whereas a method that uses more information can naturally ensure more accurate estimates of wind speed components. To conduct

research on the possibility of determining the three components of wind speed in various flight maneuvers in real time, the parametric identification method was used where the SNS data and aerometric measurement data were integrated, and the results demonstrated significant accurate estimates of the three components of wind speed in both steady and unsteady flight modes.

2. Problem statement and algorithm description

The research was conducted suggesting that the airflow has a constant direction and speed. The duration of flight for estimating the three components of wind speed is 20, 31, and 46 s for different types of flight maneuvers, such as barrel, stepwise, snake and snake with a vertical component. This means that for this time interval, the values of the components of the wind speed on the normal earth-fixed axis system are constant. Traditionally, the object model was first formulated to determine the processing sequence to generate estimates of the three components of wind speed. The three components of the airspeed of an aircraft on a normal earth-fixed axis system are defined by the following mathematical equations:

$$\begin{aligned} V_{xg_a}(t_i) &= V_{xg_CHC}(t_i) - W_{xg}; \\ V_{yg_a}(t_i) &= V_{yg_CHC}(t_i) - W_{yg}; \\ V_{zg_a}(t_i) &= V_{zg_CHC}(t_i) - W_{zg}, \end{aligned} \quad (7)$$

where $V_{xg_CHC}(t_i), V_{yg_CHC}(t_i), V_{zg_CHC}(t_i)$ are the values of the components of the aircraft velocity on the normal earth-fixed axis system measured by SNS; W_{xg}, W_{yg}, W_{zg} are the unknown values of the components of the wind speed on the normal earth-fixed axis system to be identified.

The magnitude of the airspeed vector is defined as

$$V_a(t_i) = \sqrt{V_{xg_a}^2(t_i) + V_{yg_a}^2(t_i) + V_{zg_a}^2(t_i)}. \quad (8)$$

For the transformation from normal earth-fixed axes to body-fixed axes, the corresponding directional cosine matrix is written as follows:

$$\begin{bmatrix} V_{x-a} \\ V_{y-a} \\ V_{z-a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \vartheta & \sin \vartheta & -\sin \psi \cos \vartheta \\ \sin \psi \sin y - \cos \psi \sin \vartheta \cos y & \cos \vartheta \cos y & \cos \psi \sin y + \sin \psi \sin \vartheta \cos y \\ \sin \psi \cos y + \cos \psi \sin \vartheta \sin y & -\cos \vartheta \sin y & \cos \psi \cos y - \sin \psi \sin \vartheta \sin y \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{xg-a} \\ V_{yg-a} \\ V_{zg-a} \end{bmatrix} \quad (9)$$

During the calculations, the orientation angles were taken according to the output signal of the attitude and heading reference system included in the navigation system. The constant yaw error Ψ , which can be considered constant in a section with a duration of 30–50 s, should be included in the vector of identifiable parameters.

The multiplicative error of the measuring channels is taken into account by the steepness coefficients of the aerodynamic angle sensors K_α and K_β .

In the presence of nonlinearity, an additional approximation is introduced, which is not fundamentally difficult but increases the dimension of the problem.

By using the components of the airspeed (7) on the body-fixed axes, it is possible to write the formulae for the values of the angles of attack and sideslip:

$$\begin{aligned} \alpha_u(t_i) &= -\arctg\left(\frac{V_{y-a}(t_i)}{V_{x-a}(t_i)}\right), \\ \beta_u(t_i) &= -\arcsin\left(\frac{V_{z-a}(t_i)}{V_a(t_i)}\right), \end{aligned} \quad (10)$$

where $\alpha_u(t_i), \beta_u(t_i)$ are the output signals of the measuring channels of angles of attack and sideslip, respectively.

Therefore, the object model is determined using Equations (7)–(10). The observation model takes the following form:

$$\begin{aligned} z_2(t_i) &= V_a(t_i) + C_v + \xi_v(t_i); \\ z_2(t_i) &= K_\alpha \alpha_u(t_i) + C_\alpha + \xi_\alpha(t_i); \\ z_3(t_i) &= K_\beta \beta_u(t_i) + C_\beta + \xi_\beta(t_i), \end{aligned} \quad (11)$$

where C_v, C_α, C_β are the additive errors of the aerodynamic measurement channels; K_α, K_β are

the multiplicative error coefficients; $\xi_v(t_i), \xi_\alpha(t_i), \xi_\beta(t_i)$ are the random errors of the aerodynamic measurements.

Thus, parameter identification is performed to obtain the estimates of the following values, that is three components of wind speed that are the elements of the vector a^T .

$$a^T = [W_{xg} \ W_{yg} \ W_{zg}].$$

3. Maximum likelihood estimation (MLE) for parametric identification

The problem of wind speed estimation can be solved using the maximum-likelihood estimation algorithm [15]. In general, the vector model of the object and the observation model are presented as follows:

$$y(t_i) = f(y(t_{i-1}), a, u(t_i)), \quad (12)$$

$$z(t_i) = h(y(t_i), a, u(t_i)) + \eta(t_i), \quad (13)$$

where $y(t), u(t)$ are the vectors of the output and input signals of the object, whose dimensions are r and m , respectively; $z(t_i)$ is the observation vector of dimension; a is the vector of unknown parameters that must be estimated; $\eta(t_i)$ are random errors, with respect to which assumptions of Gaussian, centering, lack of correlation and availability of information about the covariance matrix $R(t)$ are accepted.

We also assumed that the control $u(t)$ and initial conditions for the state vector $y(t_0)$ are given.

Owing to the errors caused by the lack of correlation, the joint probability distribution density is determined by simply multiplying the product of the probability distribution density at each time.

Under these conditions, the maximum likelihood criterion provides estimates with statistical properties of efficiency and non-bias. The minimized objective function of the maximum likelihood method is expressed as follows:

$$J(a) = \sum_{i=1}^N (z(t_i) - h(y(t_i), a, u(t_i)))^T \times R^{-1}(t_i) (z(t_i) - h(y(t_i), a, u(t_i))). \quad (14)$$

Equation (14) is a functional least-squares method with a weight matrix. To minimize this objective function, the modified Newton method was used in this study.

To find the estimates, $Z(t_i, a), i = 1, 2, \dots, N$, the models (12)–(13) should be numerically integrated, setting the noise entering it equal to zero.

The identification ends with the condition $|a_{k+1} - a_k| < \delta |a_k|$, where $\delta = 0.005$.

The initial data were obtained by modeling a semi-natural stand equipped with controls. This option has an advantage over purely mathematical modeling because the presence of a human operator gives the simulated flight data a greater likelihood degree. A hypothetical training aircraft was simulated in a bench experiment.

4. Estimation of three components of wind speed in distinct types of flight maneuvers

The capabilities of this algorithm were investigated based on bench modeling data. In this case, random errors were simulated in a traditional manner that was similar to a sequence of normal uncorrelated random values. Here, the main focus was on estimating the influence of the type of maneuver and duration of the sliding interval. Maneuvers such as “barrel,” “stepwise,” “snake” and “snake with a vertical component,” that is, with additional movement in the pitch channel, were considered. The northern, eastern, and vertical components of wind velocity were assumed as -7 m/s, 5 , and 2 m/s, respectively, while the

simulated flight airspeed was 65 – 105 m/s. In this version of the algorithm, it was possible to significantly reduce the duration of the sliding interval. In this study, the investigation was conducted at intervals of 0.5 and 1.0 seconds. To determine the effects of the motion parameters, the beginning of the sliding interval was shifted sequentially over the entire processing area in increments of 1 s.

4.1. The “barrel” maneuver

The results of the three components of the wind speed estimation conducted for the “barrel” maneuver are shown in Figures 1 and 2. The estimation was performed on one section of the “barrel” maneuver, which lasted for 31 s. The sliding window method was used to determine the shortest processing time at which accurate estimates of the wind speed could be obtained. Figure 1 shows the relative errors of the wind speed estimate performed with a sliding window interval of 0.5 seconds, and Figure 2 shows the results obtained using a sliding window interval of 1.0 seconds.

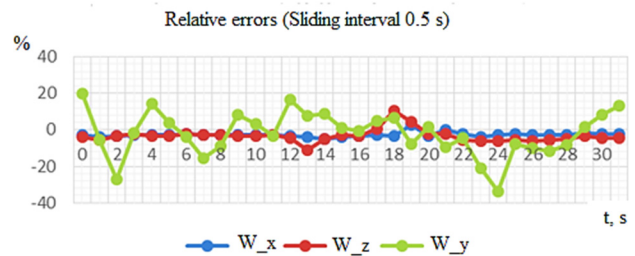


Figure 1. The relative errors of the estimation of three components of wind speed
Source: created by O.N. Korsun in Microsoft Excel

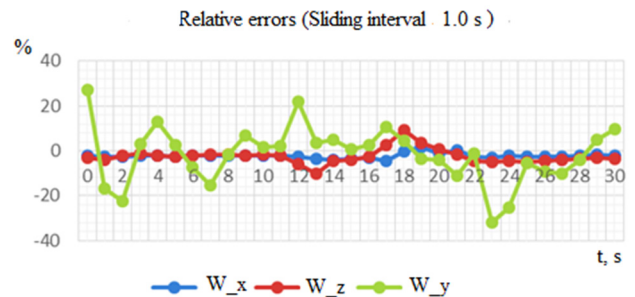


Figure 2. The relative errors of the estimation of three components of wind speed
Source: created by O.N. Korsun in Microsoft Excel

It can be observed that the errors in estimating the horizontal components of the wind speed generally do not exceed 5% in the entire section of the maneuver, and the errors in estimating the vertical component are $\pm 10\%$. A comparison of the graphs that present the relative errors with Figure 3, which shows the change in signals during the maneuver, demonstrates that some increase in errors occurs at moments of vibrant maneuvering, at high speeds of flight parameters change.

Finally, a comparison of the graphs for the values of the sliding window duration of 0.5 s and 1.0 s shows insignificant differences of the order of 2–3%. This means that the algorithm can measure three components of wind speed within 0.5 seconds, which distinguishes it from other options when the required duration of the observation interval was tens of seconds. The short duration of the sliding interval also allows rapid tracking of wind changes during flight.

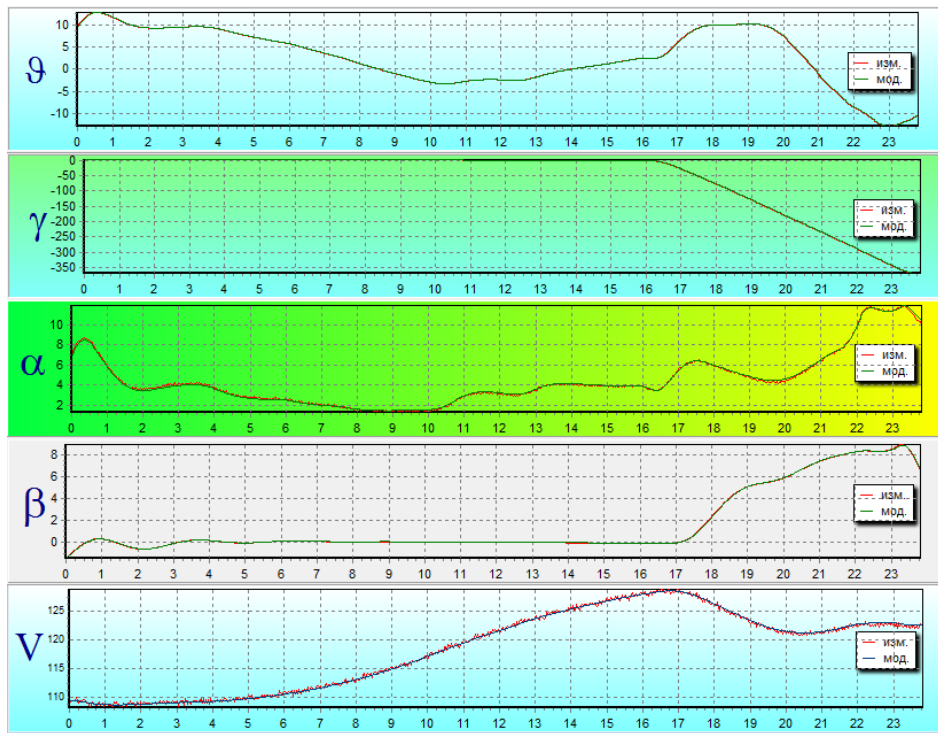


Figure 3. The values of the main flight parameters for the «barrel» maneuver within first 24 seconds
Source: created by O.N. Korsun

4.2. The “stepwise” mode in the pitch channel

The results of the three components of the wind speed estimation conducted for the “stepwise” maneuver are shown in Figures 4 and 5 and tabular data are excluded for brevity. The estimation was performed on one section of the “stepwise” maneuver, which lasted for 20 s. Figure 4 shows the relative errors of the wind speed estimate performed with a sliding window interval of 0.5 s, and Figure 5 shows the results obtained using a

sliding window interval of 1.0 s. The changes in the flight parameters in this section are shown in Figure 6.

According to the graphs, it can be observed that the errors in estimating the horizontal components generally do not exceed 5% in the entire section of the maneuver, and the errors in estimating the vertical component are $\pm 10\%$. As in the previous case, a comparison of the graphs for the values of the duration of the sliding window of 0.5 and 1.0 s shows insignificant differences of

the order of 2–3%. A comparison of the graphs of relative errors in Figures 4 and 5 with that in Figure 6, which demonstrates the change in signals during the maneuver, shows that an increase in

errors in the vertical component occurs at the moments of vigorous maneuvering, as in the previous case. Therefore, the favorable flight modes are close to straight lines with small disturbances.

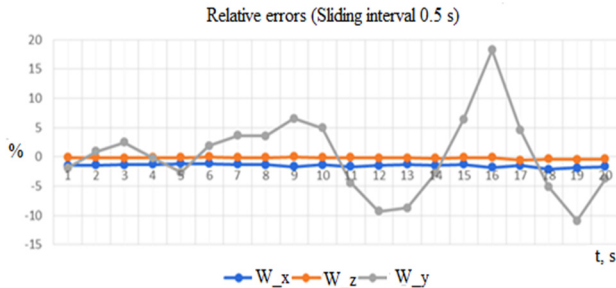


Figure 4. The relative errors of the estimation of three components of wind speed
Source: created by O.N. Korsun in Microsoft Excel

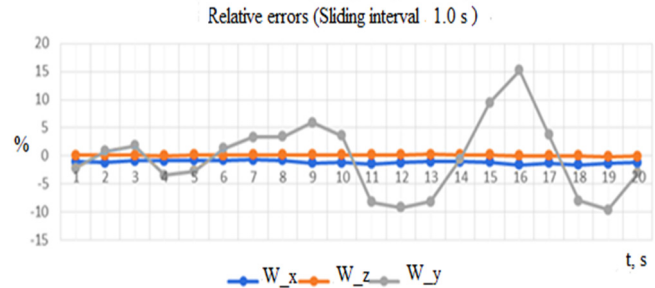


Figure 5. The relative errors of the estimation of three components of wind speed
Source: created by O.N. Korsun in Microsoft Excel

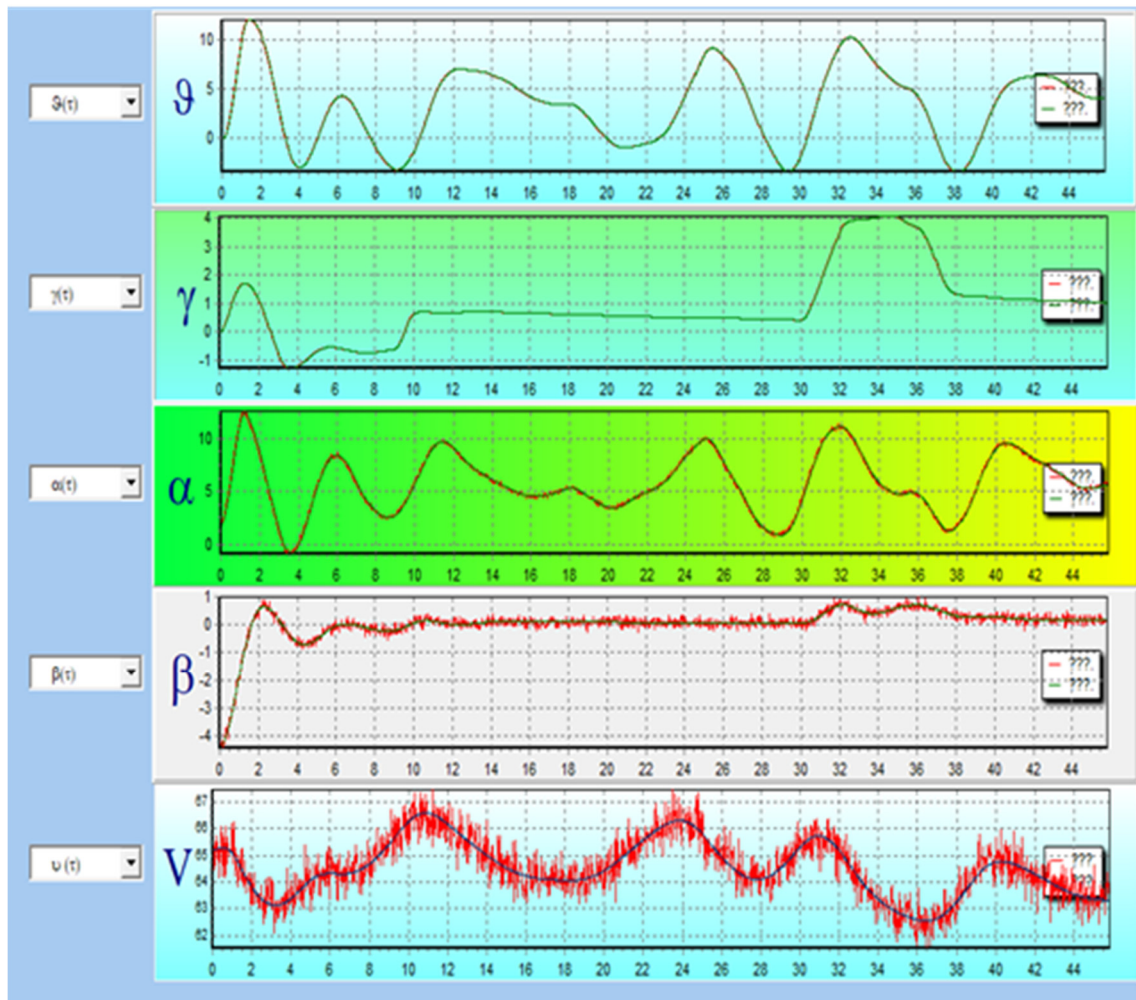


Figure 6. The values of the main flight parameters for the “pitch stepwise” maneuver within first 31 s
Source: created by O.N. Korsun

4.3. The “snake” maneuver

The results of the three components of the wind speed estimation conducted for the «snake» maneuver are shown in Figures 7 and 8; tabular data are excluded for brevity. The estimation was performed on one section of the “snake” maneuver,

which lasted 46 s. Figure 7 shows the relative errors of the wind speed estimate performed with a sliding window interval of 0.5 s, and Figure 8 shows the results obtained using a sliding window interval of 1.0 s. The changes in the flight parameters in this section are shown in Figure 9.

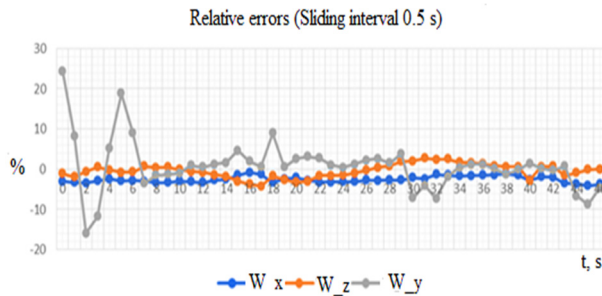


Figure 7. The relative errors of the estimation of three components of wind speed
Source: created by O.N. Korsun in Microsoft Excel

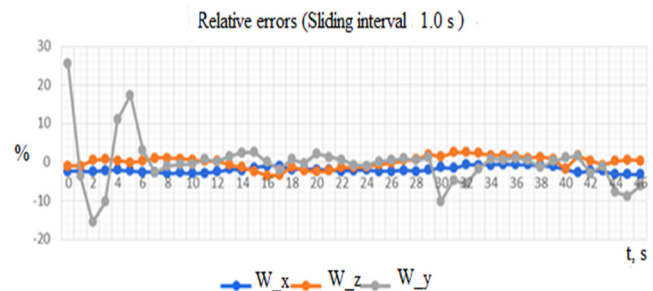


Figure 8. The relative errors of the estimation of three components of wind speed
Source: created by O.N. Korsun in Microsoft Excel

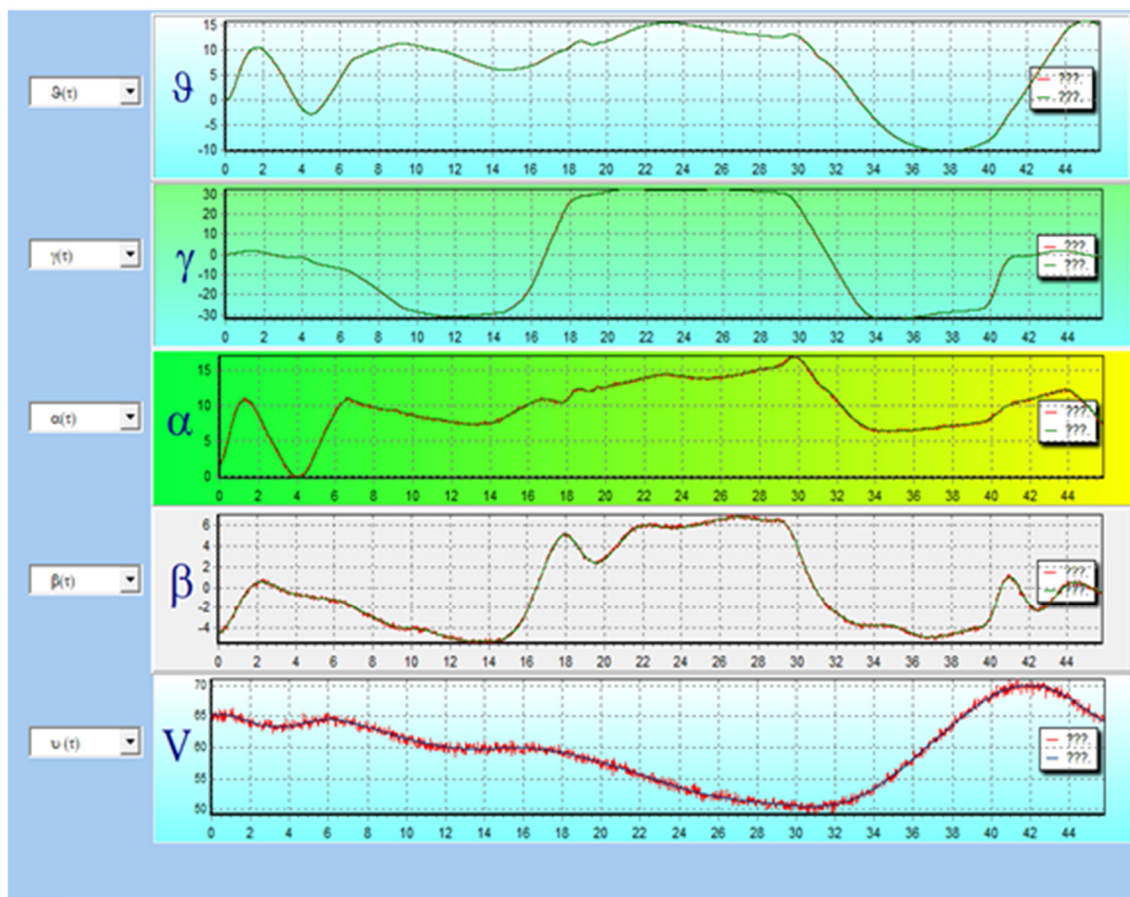


Figure 9. The values of the main flight parameters for the “snake” maneuver within first 46 s
Source: created by O.N. Korsun

It can be observed in the graphs that the estimation errors of both the horizontal and vertical components generally do not exceed 5% in the entire maneuver section, with the exception of certain short sections, where the estimation errors of the vertical component reach $\pm 10\%$. As in the previous case, a comparison of the graphs for the values of the duration of the sliding window of 0.5 and 1.0 s shows insignificant differences of the order of 2–3%. A comparison of the error graphs in Figures 7 and 8 with Figure 9, which shows the change in signals during the maneuver, shows that the increase in errors in the vertical component occurs at the moments of vigorous maneuvering, as in the previous cases. Thus, the previously formulated conclusion confirms that the most favorable flight modes for evaluation are horizontal flights with small disturbances.

4.4. The «snake with a vertical component» maneuver

The results of the three components of the wind speed estimation conducted for the «snake with a vertical component» maneuver are shown in Figures 10 and 11; tabular data are excluded for brevity. The estimation was performed on one section of the “snake with a vertical component” maneuver that lasted 46 s. Figure 10 shows the relative errors of the wind speed estimate performed with a sliding window interval of 0.5 s, and Figure 11 shows the results obtained using a sliding window interval of 1.0 s. The changes in the flight parameters in this section are shown in Figure 12.

It can be observed in the graphs that the errors in estimating the horizontal components generally do not exceed 5% in the entire section of the maneuver, and the errors in estimating the vertical component are $\pm 10\%$. As in the previous case, a comparison of the graphs for the values of the duration of the sliding window of 0.5 and 1.0 s shows insignificant differences of the order of 2–3%. A comparison of the error graphs in Figures 4 and 5 with Figure 6, which shows the change in signals during the maneuver, demonstrates that an increase in errors in the vertical component occurs at the moments of vigorous maneuvering, as in the

previous case. Thus, it was confirmed that favorable flight modes are close to straight lines with small disturbances.

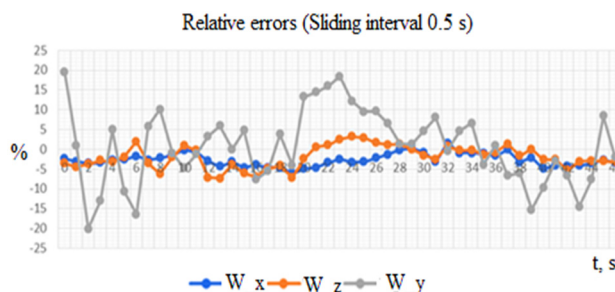


Figure 10. The relative errors of the estimation of three components of wind speed
Source: created by O.N. Korsun in Microsoft Excel

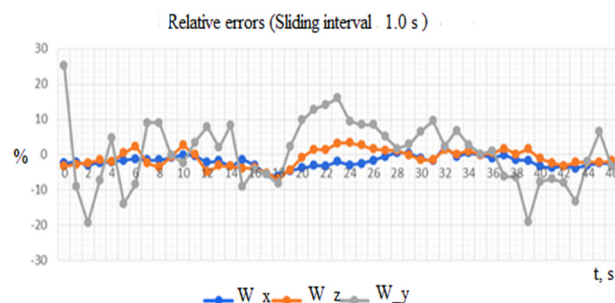


Figure 11. The relative errors of the estimation of three components of wind speed
Source: created by O.N. Korsun in Microsoft Excel

Therefore, with the full vector of aerometric measurements and the level of non-excluded systematic errors on the order of 3–5% for maneuvers such as straight horizontal flight, steady turn, snake, pitch stepwise, the errors in estimating all three components of wind speed do not exceed 5–7% for the duration of the measurement interval of 0.5–1 s, which allows not only to estimate the constant wind speed, but also to track its changes.

Figure 13 presents the results of fitting the simulated flight data with the wind velocity using the aircraft motion model, which ignores the wind. The graph shows that the discrepancies are considerable, especially for aerometric parameters, such as angles of attack, sideslip, and airspeed. This example illustrates the importance of considering the wind velocity.

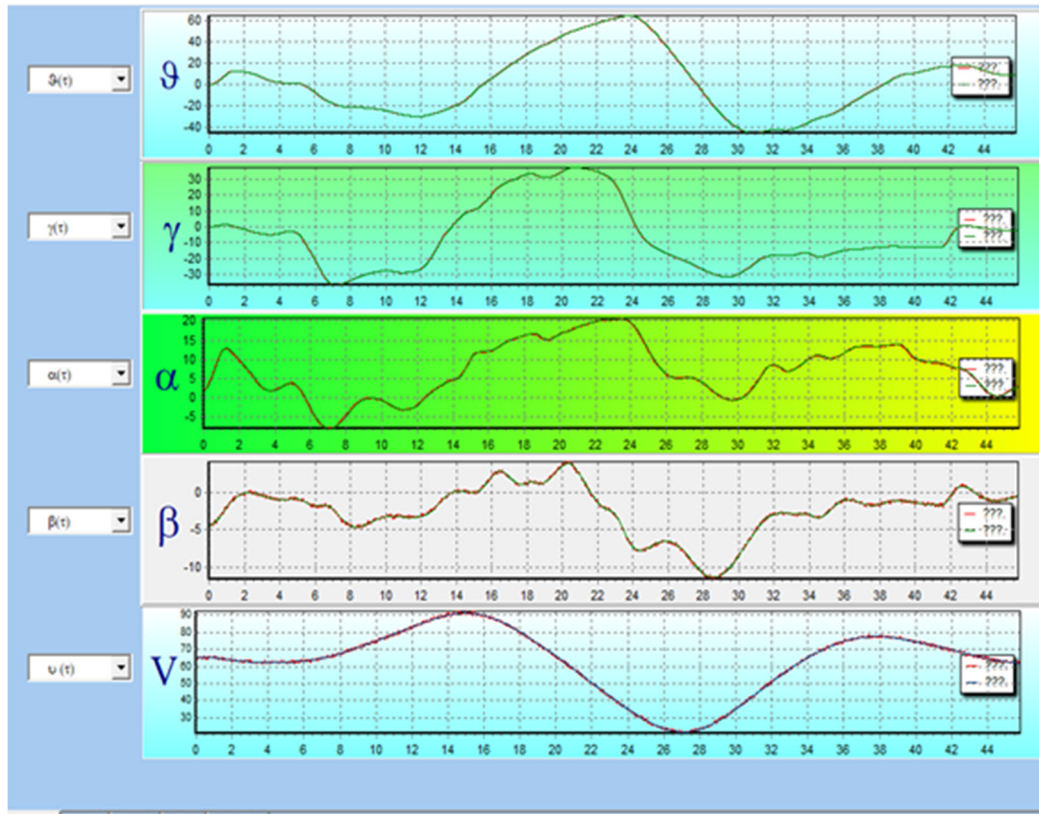


Figure 12. The values of the main flight parameters for the “snake with a vertical component” maneuver within first 46 s
Source: created by O.N. Korsun

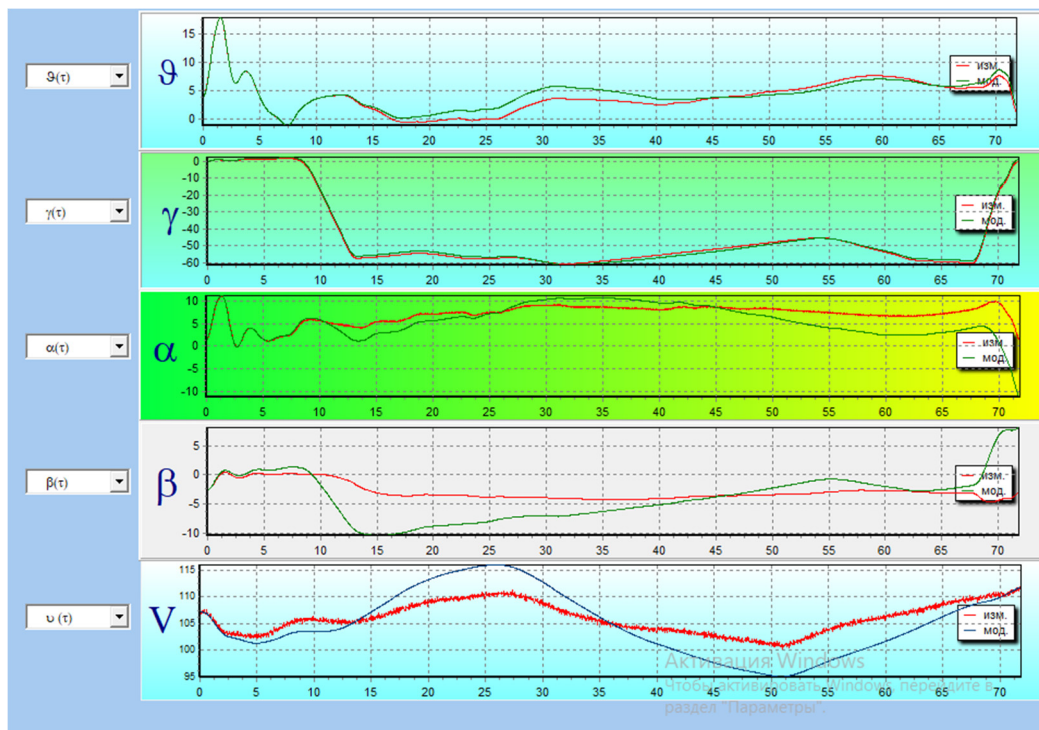


Figure 13. The values of the main flight parameters for the “snake with a vertical component” maneuver within first 72 s
Source: created by O.N. Korsun

Conclusion

According to the simulation data from the flight simulator, a study on the accuracy characteristics of the algorithm for estimating the three components of wind speed based on the data obtained from the satellite navigation system was performed.

The influence of the duration of the sliding window and types of flight maneuvers, such as pitch stepwise, barrel, straight horizontal flight, steady turn, snake and snake with a vertical component, on the accuracy of identification of the three components of wind speed was investigated.

According to the results given by the proposed method for estimating three components of wind speed using parametric identification where the angle of attack, sideslip angle, and airspeed are applied, it can be observed that more accurate estimates of the three components of wind speed can be ensured when the estimation method utilizes more information about the aircraft's motion.

References

1. Vasilchenko KK, Kochetkov YuA, Leonov VK, Poplavskii BK. *Aircraft Flight Test*. Moscow: Mashinostroenie: Publ.; 1996. (In Russ.)
2. Byushgens GS, Chernyshev SL, Homan MG, Kuvshinov VM, Fedosov EA. *Aerodynamics, stability and controllability of supersonic aircraft*. Moscow: Nauka Publ.; 2016. (In Russ.)
3. Grumondz V. Airship Balancing and Stability at Longitudinal Established Motion. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Moscow. 2019;476(1): 012013. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/476/1/012013>
4. Luchtenburg DM, Rowley CM, Lohry MW, Martinnelli L, Stengel RF. Unsteady high angle of attack aerodynamic models of a generic jet transport. *Journal of Aircraft*. 2015;52(3):890–895. <https://doi.org/10.2514/1.C032976>
5. Petoshin VI, Chasovnikov EA. Aerodynamic characteristics for a passenger aircraft model with harmonic oscillations on rolling and yawing angles at high angles of attack. *Thermophysics and aeromechanics*. 2013;20(1): 39–48. <https://doi.org/10.1134/S0869864313010046>
6. Grishina AY, Efremov AV. Development of a Controller Law for a Supersonic Transport Using Alternative Means of Automation in the Landing Phase. In: Streets DY, Korsun ON. (eds.). *Recent Developments in High-Speed Transport*. Springer Aerospace Technology. Springer, Singapore. 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9010-6_5
7. Korsun ON, Poplavsky BK, Prihodko SJ. Intelligent support for aircraft flight test data processing in problem of engine thrust estimation. *Procedia Comput. Sci.* 2017; (103):82–87. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.017>
8. Korsun ON, Poplavsky BK, Om MH. Identification of the Engine Thrust Force Using Flight Test Data. In *Proceedings of the International Conference on Aerospace System Science and Engineering 2021. ICASSE 2021. Lecture Notes in Electrical Engineering*; Jing Z, Strelets D. (eds.). Springer: Singapore, 2023;(849). https://doi.org/10.1007/978-981-16-8154-7_30
9. Lin Z, Xiao H, Zhang X, Wang Z. Thrust Prediction of Aircraft Engine Enabled by Fusing Domain Knowledge and Neural Network Model. *Aerospace*. 2023;10(6):493. <https://doi.org/10.3390/aerospace10060493>
10. Korsun ON, Nikolaev SV, Om MH. Detection of dynamic errors in aircraft flight data. In: *Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Moscow. 2021;(1027):012011. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1027/1/012011>
11. Carlson HA, Verberg R, Hemati MS, Rowley CW. A flight simulator for agile fighter aircraft and nonlinear aerodynamics. *Proceedings of the 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting*, AIAA 2015-1506. Florida: Kissimmee, 2015. p. 1–22. <https://doi.org/10.2514/6.2015-1506>
12. Nikolaev SV. Method of simulation in flight tests of aircraft. *Applied Physics and Mathematics*. 2017;(3): 57–68. (In Russ.) EDN: XGIVEL
13. Efremov AV, Tjaglik MS, Irgaleev IH, Tsipenko VG. Integration of predictive display and aircraft flight control system. *Proceeding of MATEC Web of Conferences*. 2017; (99):03005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179903005>
14. Klein V. Estimation of Aircraft Aerodynamic Parameters from Flight Data. *Prog. Aerospace Sci.* 1989;(26): 1–77.
15. Klein V, Morelli E. Aircraft System Identification. Theory and Practice. *Aeronautical Journal New Series*. 2006;111(1123):602–603. <https://doi.org/10.1017/S0001924000087194>
16. Korsun ON, Poplavsky BK. Approaches for flight tests aircraft parameter identification. *29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, ICAS. St. Petersburg; 2014:1804
17. Jategaonkar RV. Flight vehicle system identification: A time domain methodology (USA, Reston: AIAA) 2006. <https://doi.org/10.2514/4.866852>
18. Ovcharenko VN. *Identification of aerodynamic characteristics of aircraft by flight data*. Moscow: MAI Publishing House; 2017. (In Russ.)
19. Larsson R. *System Identification of Flight Mechanical Characteristics*. Linköping Studies in Science and Technology, Licentiate Thesis, Linköping University, Sweden. 2013. Available from: <http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:622859/FULLTEXT01.pdf> (accessed: 11.04.2024)

20. Om MH, Latt KZ. Influence Analysis of Input Signal Forms on the Accuracy of Aerodynamic Parameter Identification in Aircraft Longitudinal Motion. *Cloud of Science*. 2017;4(4):636–649.
21. Song Y, Song B, Seanor B., Napolitano M.R. On-line aircraft parameter identification using fourier transform regression with an application to F/A-18 HARV flight data. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2002; 16(3):327–337. <https://doi.org/10.1007/BF03185230>
22. Pushkov SG, Kharin EG, Kozhurin VR, Lovitsky LL. Technology for determining aerodynamic errors and air parameters in flight tests of aircraft using satellite means of trajectory measurements. *Problems of flight safety*. 2006; (7):12–19. (In Russ.)
23. Pushkov SG, Lovitsky LL, Korsun ON. Wind speed determination methods in flight tests using satellite navigation systems. *Mechatronics, automation, control*. 2013;(9):65–70. (In Russ.) EDN: RBPNCV
24. Guadaño LH, Valdés RA, Nieto FJ. Using aircraft as wind sensors for estimating accurate wind fields for air traffic management applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2014;228(14). <https://doi.org/10.1177/095441001452474>
25. Hurter Ch, Alligieri R, Gianazza D, Puechmorel S, Andrienko G. Wind parameters extraction from aircraft trajectories. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2014. p. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.01.005> hal-00987690
26. Benders S, Wenz A, Johansen TA. Adaptive Path Planning for Unmanned Aircraft Using In-flight Wind Velocity Estimation. *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. Dallas, TX, USA, 2018. p. 483–492. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2018.8453341>
27. Khadeeja TK, Singh J. Wind Profile Estimation during Flight Path Reconstruction. *Defence Science Journal*. 2020;70(3):231–239. <https://doi.org/10.14429/dsj.70.13596>
28. Hajiyeu Ch, Cilden-Guler D, Hacizade U. Two-Stage Kalman Filter for Estimation of Wind Speed and UAV States by using GPS, IMU and Air Data System. *Wseas transactions on electronics*. 2019;10:60–65.
29. Ahmed Z, Woolsey CA. Aerodynamic model-free wind estimation using a small, fixed-wing uncrewed aerial vehicle. *Virginia Space Grant Consortium*. 2024. Available from: https://vsgc.odu.edu/wp-content/uploads/2024/04/AhmedZakia_SRC_Submission__4_-1.pdf (accessed: 11.04.2024)

About the authors

Oleg N. Korsun, D.Sc. (Technology), Head of the Scientific and Educational Center, State Scientific Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS), Moscow, Russia; Professor, Department of Design and Certification of Aircraft Engineering, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 2472-6853, ORCID: 0000-0003-3926-1024; e-mail: marmotto@rambler.ru

Moung Htang Om, Cand. Sc. (Technology), Post-doctoral Candidate, Department of Design and Certification of Aircraft Engineering, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; ORCID: 0000-0002-7770-2962; e-mail: mounhtangom50@gmail.com

Сведения об авторах

Корсун Олег Николаевич, доктор технических наук, руководитель научно-образовательного центра, Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (ГосНИИАС), Москва, Россия; профессор кафедры проектирования и сертификации авиационной техники, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 2472-6853, ORCID: 0000-0003-3926-1024; e-mail: marmotto@rambler.ru

Ом Моунг Хтанг, кандидат технических наук, докторант кафедры проектирования и сертификации авиационной техники, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия; ORCID: 0000-0002-7770-2962; e-mail: mounhtangom50@gmail.com



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-4-441-459

УДК 796/799

EDN: CCNDAS

Научная статья / Research article

Модель управления соревновательной деятельностью команд топ-уровня на основе компьютерного зрения в онлайн

С.Л. Гольдштейн, А.А. Полозов^{ID✉}, Н.В. Папуловская^{ID},
Н.А. Мальцева^{ID}, М.В. Краев^{ID}

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

✉ a.a.polozov@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 10 марта 2024 г.

Доработана: 10 июля 2024 г.

Принята к публикации: 12 августа 2024 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Нераздельное соавторство

Аннотация. Использование технологии PIRS в работе с мужской сборной России по мини-футболу (гл. тренер С.Л. Скорovich) в период с 2010 по 2018 г. позволило ей переместиться с пятого места в мировом рейтинге на первое. Проблема управления спортивной командой высокого уровня состоит в том, чтобы подобрать индикаторы управления и их значения с целью получения наилучшего результата ближайшего матча. Обычно такими параметрами являются оптимизация состава, направленность игры, расстановка своих игроков, рекомендуемые им задания. Цель исследования — структурирование деятельности по переходу от технологии PIRS в работе с командами топ-уровня к созданию системы PIRSONline. Описание системы PIRSONline для разработки ее технической части потребовало получения ряда схем с их описанием, которые регламентировали разработку проекта. Это состав документации, подсистемы, функциональная схема, компонентная схема, матрица «функция — компонент». Сформированная в итоге последовательность действий по разработке PIRSONline включает получение изображения, блок инициализации параметров игры, детекция мяча, определение 3D-координат мяча, детекция игроков, трекинг, классификация игроков и судей, определение позы игрока. Это позволило осуществить комплексный подход к онлайн-управлению соревновательной деятельностью команд топ-уровня. Использование современных методов компьютерного зрения и машинного обучения дало возможность создать интерактивную визуализацию данных.

Ключевые слова: компьютерное зрение, онлайн-управление, система принятия решений, визуализация, спортивная команда, трекинг, тактика, рейтинг

Для цитирования

Гольдштейн С.Л., Полозов А.А., Папуловская Н.В., Мальцева Н.А., Краев М.В. Модель управления соревновательной деятельностью команд топ-уровня на основе компьютерного зрения в онлайн // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 4. С. 441–459. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-441-459>



A model for Managing the Competitive Activities of Top-Level Teams Based on Computer Vision Online

Sergei L. Goldstein, Andrey A. Polozov[✉], Natalia V. Papulovskaya^{ID},
Natalya A. Maltseva^{ID}, Maxim V. Kraev^{ID}

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

✉ a.a.polozov@mail.ru

Article history

Received: March 10, 2024

Revised: July 10, 2024

Accepted: August 12, 2024

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution

Undivided co-authorship.

Abstract. The use of PIRS (Polozov Information Rating System) technology in working with the Russian men's national futsal team (head coach S.L. Skorovich) in the period from 2010 to 2018 allowed it to move from 5th place in the world ranking to first. The problem of managing a high-level sports team is to select the control indicators and their values in order to get the best result of the next match. Usually such parameters are: optimization of the composition, the direction of the game, the placement of their players, the tasks recommended to them. The aim of the study was to structure the activities for the transition from PIRS technology in working with top-level teams to the creation of the PIRSONline system. The description of the PIRSONline system for the development of its technical part required obtaining a number of schemes with their description, which regulated the development of the project. This is the composition of documentation, subsystems, functional diagram, component diagram, function-component matrix. The resulting sequence of actions for the development of PIRSONline includes image acquisition, a block for initializing game parameters, ball detection, determining the 3D coordinates of the ball, detecting players, tracking, classifying players and referees, determining the player's pose. This made it possible to implement an integrated approach to online management of competitive activities of top-level teams. The use of modern computer vision and machine learning methods has made it possible to create interactive data visualization.

Keywords: computer vision, online management, decision-making system, visualization, sports team, tracking, tactics, rating

For citation

Goldstein SL, Polozov AA, Papulovskaya NV, Maltseva NA, Kraev MV. A model for managing the competitive activities of top-level teams based on computer vision online. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(4):441–459. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-441-459>

Введение

Технология PIRS (Polozov Information Rating System) была сформирована в период с 2010 по 2018 г. в ответ на просьбу тренера сборной России по мини-футболу С.Л. Скорович. Он начал руководить командой в 2010 г. С 2010 по 2018 г. технология PIRS активно использовалась тренером для анализа результатов игр. В этот период мужская сборная России всегда выходила в финал (ЧЕ, ЧМ). Как результат — изменение рейтинга сборной с пятого места на первое.

Тогда нашей команде сложнее всего давались игры со сборной Испании. С 1995 по 2010 г. выиграть не удалось ни разу. Поэтому основной акцент был сделан на моделировании матча со сборной Испании.

Актуальность. Современный профессиональный спорт предъявляет все более высокие требования к эффективности подготовки и управления командами. Традиционные методы, основанные на экспертной оценке тренеров, уже не всегда позволяют добиваться желаемого результата. В этой связи все более актуальным

становится использование научных методов и технологий, в том числе основанных на современных методах компьютерного зрения.

Цель исследования — обеспечение в режиме online управления спортивной игрой команды топ-уровня по мини-футболу.

1. Обзор состояния проблемы

Игровые виды спорта самые консервативные. В них до настоящего времени, несмотря на все достижения спортивной науки, уровень тренерской экспертной оценки остается выше уровня научных индикаторов. Однако информационный массив спортивной игры является огромным и не позволяет возможностям одного человека обрабатывать и управлять им. Речь идет о большом числе участников видов игровых единоборств.

Самым распространенным спортивным термином уже много лет являются технико-тактические действия (далее — ТТД). Множество ученых не смогли дать ему адекватную трактовку ни по определению понятия ТТД, ни по их численности. Оценка индивидуальных ТТД по методике Ю.А. Морозова состоит из 8 аспектов [1], Г.А. Голденко — из 9 ТТД [2]. В работах В.В. Костюкова, а также М.М. Шестакова (1991) их уже 12; С.Ю. Тюленьков (1997) — 9; Е. Федотов (2004) дают нам 7 видов ТТД [3]. М.А. Годик [4] предлагал, например, введение передач на ход партнеру на чужой половине поля до момента получения, в момент получения и после. М.А. Годик считал в играх сборной процент брака ТТД и объем движения игрока с субмаксимальной и максимальной мощностью. В.Н. Платонов приводит ряд диаграмм с очень большим множеством индикаторов [5]. Примерно с 2015 г. начинают появляться данные об автоматизации процесса подсчета ТТД в ходе игры. А.Г. Поливаев сделал это на примере мини-футбола [6]. Известны аналоги в Германии [7]. Однако резкое увеличение числа ТТД (с 10 до 100) привело к обвалу коэффициента корреляции суммы ТТД с результатом игр [8]. В целом дискуссия продолжается [9; 10].

Сегодняшние лидеры IT-рынка спортивной аналитики, такие как InStat, Wyscout, Iceberg, Stats, предоставляют тренеру лишь статистическую справку о ранее сыгранном матче его команды. Преобразование этой информации в последовательность шагов по управлению в следующем матче с другим соперником тренер должен делать самостоятельно. Компании спортивной аналитики не располагают алгоритмом такого решения, а лишь пытаются дать удобный интерфейс сложившейся практики работы в топ-клубах.

Необходимо отметить, что поставщиком новостей стали именно IT-компании, а не научные журналы в IT-отрасли. В [11] обсуждались различные приложения компьютерного зрения в спорте, такие как отслеживание игроков и мячей, оценка поз и системы поддержки принятия решений для судей. Особое внимание уделено будущим направлениям исследований, в частности принятию решений в реальном времени в командных видах спорта, таких как футбол и баскетбол. В [12] приведены факты того, как компьютерное зрение помогает в распознавании действий в реальном времени, прогнозировании траектории мяча и анализе производительности команды. Рассмотрены приложения в таких видах спорта, как хоккей и футбол, с упором на оптимизацию тренировок и тактических решений. В [13] рассмотрено использование искусственного интеллекта (ИИ) для отслеживания игроков, предотвращения травм и тактического анализа в спорте, продемонстрированы такие системы, как SportVU и Prozone, которые были приняты ведущими футбольными и баскетбольными командами для повышения эффективности игры. В [14] обсуждается роль ИИ в спортивном судействе, например Hawk-Eye в теннисе и крикете, также рассмотрено отслеживание мяча, мониторинг толпы и поддержка принятия решений в реальном времени для судей в футболе и других командных видах спорта. Исследование [15] фокусируется на отслеживании мяча и идентификации событий в настольном теннисе и баскетболе с использованием компьютерного зрения. Применяемые ме-

тоды помогают улучшить анализ производительности игроков в реальном времени. В [16] демонстрируется применение интеллектуальных систем отслеживания для углубленного анализа движений игроков в футболе и баскетболе. Модели ИИ фокусируются на оптимизации игровых стратегий и снижении рисков травм. В [17], посвященной футболу, рассматривается, как оптические системы отслеживания в реальном времени помогают управлять тактикой игроков и анализировать стратегии команд. Такие системы, как SportsVu, получили широкое распространение в профессиональных лигах по всему миру. В [18] рассматривается сотрудничество AWS с ведущими футбольными командами по использованию ИИ для прогнозирования результатов матчей, оптимизации построения игроков и анализа стратегий игры в реальном времени.

Описываются приложения компьютерного зрения в фитнесе, от мониторинга качества упражнений до отслеживания движений игроков¹. Системы анализируют данные в режиме реального времени, предоставляя обратную связь по форме и профилактике травм во время спортивных тренировок. Обсуждается, как ИИ используется для прогнозирования футбольных голов путем анализа позиции игрока, траектории мяча и других данных игры в режиме реального времени². Эта предиктивная технология помогает тренерам принимать более обоснованные тактические решения во время матчей.

В игровых видах спорта до сих пор уровень тренерской экспертной оценки остается выше уровня научных индикаторов. Огромный объем информации, генерируемый во время игры, делает невозможным ее эффективную обработку человеком. Алгоритмы для онлайн-управления командами в реальном времени на основе компьютерного зрения находятся в процессе разработки. Ни в анализе патентов, ни в анализе научных статей мы не видим разработанных моделей игры.

Предлагаемое решение — система PIRSonline, основанная на технологии PIRS, разработанной авторами, позволит:

- в режиме онлайн отслеживать и анализировать действия игроков и команды в целом;
- оценивать эффективность технико-тактических действий (ТТД);
- прогнозировать развитие игровых ситуаций;
- вырабатывать рекомендации для тренеров по управлению командой.

Преимущества системы PIRSonline:

- повышение эффективности подготовки и управления командами;
- объективность оценки ТТД;
- возможность прогнозирования развития игровых ситуаций;
- оперативность принятия решений тренерами.

2. Материалы и методы. Технология PIRS

Прежде всего, авторы посчитали необходимым разделить ТТД и технико-тактические единоборства (далее — ТТЕ) [10]. Передачи, которые составляют большую часть ТТД, можно набирать при отсутствии соперника на поле. ТТЕ считает именно выигранные единоборства. Сюда относятся обыгрывание, пас за спину и т.д. Каждое такое выигранное ТТЕ дает перемещение мяча с точки меньшей вероятности забить гол в точку более высокой вероятности. Этот прирост далее будем называть *стоимостью* ТТЕ. Сумма приростов стоимости всех выигранных ТТЕ с учетом фактора реализации воплощается в число забитых голов. Баланс З (забитых) и П (пропущенных) голов является основой для определения рейтинга команды в целом среди других команд. Для расчета вероятности выиграть ТТЕ необходимо рассчитать R_{til} и R_{tjl} — рейтинги игроков соперничающих команд в предстоящем матче по компонентам ТТЕ, которые, в свою очередь, должны быть получены из

¹ Computer Vision in Fitness and Athletics // Voxel51. URL: <https://voxel51.com/> (accessed: 21.02.2024).

² Predicting Soccer Goals with AI and Computer Vision. Sportradar // SportsData 2024. URL: <https://sportradar.com/> (accessed: 21.02.2024).

рейтингов команд. Сервис ga-first.com создан для определения рейтингов команд на основе решения системы линейных уравнений (СЛУ) методом Гаусса из результатов команд (uefa.com, flashscore.com и др.). Запишем результат матча в спортивных играх (1):

$$B_i = Z_i - \Pi_i = Z_{i1} - \Pi_{i1} + \dots + Z_{in} - \Pi_{in}, \quad (1)$$

где Z_i , Π_i — забитые и пропущенные голы i -команды в турнире; B — баланс команды в турнире (по условиям игры команды борются за $B > 0$); n — число игр.

$$\begin{aligned} \frac{(Z_i - \Pi_i)}{(Z_i + \Pi_i)} &= \frac{(Z_{i1} - \Pi_{i1})}{(Z_i + \Pi_i)} + \dots + \frac{(Z_{in} - \Pi_{in})}{(Z_i + \Pi_i)}, \\ \Delta i &= \frac{(Z - \Pi)}{(Z + \Pi)} = \frac{(Z_1 + \Pi_1)}{(Z + \Pi)} \times \frac{(Z_1 - \Pi_1)}{(Z_1 + \Pi_1)} + \dots + \\ &+ \frac{(Z_n + \Pi_n)}{(Z + \Pi)} \times \frac{(Z_n - \Pi_n)}{(Z_n + \Pi_n)}, \end{aligned}$$

где $\Delta i = (Z - \Pi) / (Z + \Pi)$ — баланс голов Z и Π по интервалу игр i -команды (формула 2):

$$\delta i = (Z_{ij} + \Pi_{ij}) / (\sum Z_i + \sum \Pi_i), \quad (2)$$

$$\Delta i = (Z_i - \Pi_i) / (Z_i + \Pi_i), \quad (3)$$

$$Rt_i = Rt_{cp} + 1000 \times \Delta i j,$$

где Rt_i — рейтинг одной i -команды за N игр из ее рейтингов в каждой игре

$$Rt_{cp} + \Delta i = \delta_1 \times (Rt_{cp} + \Delta_{i1}) + \dots + \delta \times (Rt_{cp} + \Delta).$$

Считаем средним значением участников турнира 2200:

$$\begin{aligned} Rt_i &= \delta_{i1} \times Rt_{i1} + \delta_{i2} \times Rt_{i2} + \dots + \delta_{in} \times Rt_{in}; \\ Rt_i &= Rt_j + \Delta i j; \\ Rt_i &= \sum_{j=1}^N \delta_j \times Rt_j + \Delta i; \\ Rt_{cp} &= \left(\frac{1}{n} \right) \times \sum_{l=1}^n Rt_l = 2200, \end{aligned} \quad (4)$$

где $Rt_{cp} = 2200$ — среднее значение рейтинга турнира, при котором значение рейтинга самого слабого участника — число положительное (формулы 3 и 4).

В рейтинге непринято выражать уровень участников отрицательными и дробными числами. Отсюда среднее значение рейтинга всех участников — 2200.

Теперь нам необходимо разделить задачи выигрыша (и реализации голевых моментов. Суть игры сводится к доставке мяча (шайбы и т.п.) через последовательность ТТЕ в точку наибольшей вероятности забить гол и реализации голевого момента. Нам придется собрать данные по технико-тактическим единоборствам (ТТЕ) и реализации голевых моментов. Из анализа видео получаем v/v_{cp} — скорость полета мяча в сравнении со средней скорости полета мяча на основе покадровой оценки движения мяча по траектории либо на основе экспертной оценки (рис. 1).

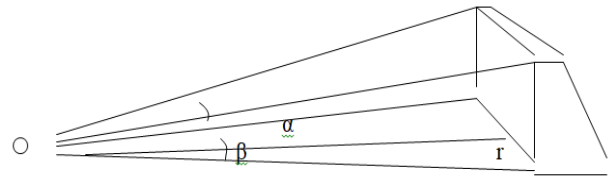


Рис. 1. Определение индекса
Источник: выполнено А.А. Полозовым

Figure 1. Definition of the index
Source: made by A.A. Polozov

$$\phi = \frac{\alpha \times \beta}{\tau} = \frac{\alpha \times \beta}{r} \times v = \phi_0 \times v, \quad (5)$$

где α , β — горизонтальный и вертикальные углы, под которыми видны ворота из данной точки поля; τ — время полета мяча до ворот; r — расстояние от мяча до ворот; v — скорость полета мяча до ворот; v_{cp} — средняя скорость полета мяча в турнире при ударах по воротам; ϕ — значение индекса точки поля, скорректированное на v/v_{cp} ; ϕ_0 — значение индекса точки поля в зависимости от α , β , τ (формула 5) [8; 10].

Далее выделяли определенные интервалы значений индекса и обобщали внутри них ста-

тистику успешности ударов по воротам. Отдельно выделяли удары по воротам головой, правой и левой ногой, выполняемые с сопротивлением, в падении, при высокой скорости передачи и т.д. В этом случае дисперсия значений успешности ударов по данной методике была минимальной. Если мяч при ударе по воротам летит быстрее в несколько раз, то это равносильно приближению точки удара к воротам за счет времени полета мяча. Поэтому значение ϕ масштабируется коэффициентом $v/v_{\text{ср}}$, что показано в [10]. Обозначим p — вероятность реализовать момент (забить мяч, шайбу и т.д.) с точки ϕ , при скорости полета мяча v , одним из четырех типов удара ($A(N)$):

$$p(x, y) = 1 - \exp\left(\frac{-\phi(x, y)}{A}\right), \quad (6)$$

где A — коэффициент успешности реализации голевого момента (формула 6). Их 4 вида — для ударов головой, обеими ногами и в безопорном положении. A рассчитывается как минимальная дисперсия D с реализацией (сумма забитых и сумма p) в играх (формула 7):

$$D(A) = \min(\Sigma 3(A) - \Sigma p(A)). \quad (7)$$

Учитываем только те ТТЕ, в результате которых растёт (формула 8) вероятность забить гол с новой точки пребывания мяча ($P_1 - P_2 > 0$):

$$Ct(x, y) = P_i(x_0, y_0) - P_i(x_1, y_1), \quad (8)$$

где Ct — стоимость выигранного матча; ТТЕ — ожидаемое изменение счета матча в случае успешности ТТЕ; $P_i(x, y)$ — вероятность забить гол с точки поля с координатами (x, y) .

$Ct(x, y) = P\{(x, y), (\text{stats})\}$. В итоге — формулы 9 и 10:

$$\Delta = \left(\frac{(\Sigma Ct_i \times Ni(+)) - (\Sigma Ct_i \times Ni(-))}{\Sigma Ct_i \times Ni(+) + \Sigma Ct_i \times Ni(-)} \right) \times 1000; \quad (9-10)$$

$$\delta = \Sigma (Ctat \times Nat + Ctob \times Nob) / (3 + \Pi),$$

где Cta , Cto — стоимость выигранного ТТЕ в атаке (Nat) и обороне (Nob).

Оценка реализации голевого момента PIRS с нанесенными на нее значениями индекса для футбола. Из [14] известно

$$Rti = Rtoi \times \exp(-C \times Ntte):$$

$$3_{\max} = \Sigma_{i,j,l,k} \times Ct, \quad (11)$$

где ΣTTE — число успешных ТТЕ в матче (формула 11).

Из стоимости ТТЕ получаем δ и Δ каждого игрока в матче по каждому компоненту игры. Rti и Rtj получаем с сервиса first.com по формуле (12) (рис. 2).

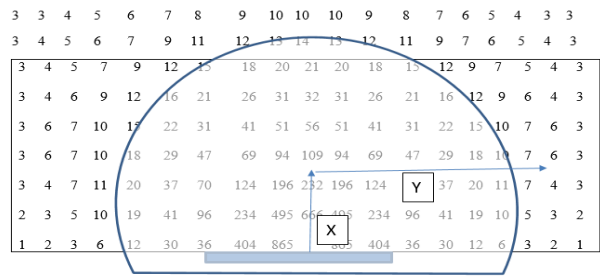


Рис. 2. Распределение индекса по штрафной площадке в футболе
Источники: выполнено А.А. Полозовым
Figure 2. Distribution of the index in the penalty area in football
Source: made by A.A. Polozov

$$\begin{cases} Rtil = \sum_{i=1}^n \delta_{ijl} \times Rtjl + \Delta il; \\ Rtil = \sum_{i=1}^k \delta_{jil} \times Rtil + \Delta il; \\ (\Sigma Rtil + \Sigma Rtjl) / (n + k) = Rt(ij \text{ First.com}), \end{cases} \quad (12)$$

где δ_{ij} — доля результата j игры в общей совокупности результатов i -й команды; n — кол-во игроков нашей команды; k — кол-во игроков команды соперника.

Распределение δ_i по игре в обороне берем с предыдущего матча предстоящего соперника. По каждому ТТЕ (46 видов) есть отдельное решение СЛУ (12). Состояние системы в зависимости от управляющих воздействий в момент времени t может быть записано следующим образом (формула 13):

$$S = Si(t, PIRS) =$$

$$= \left\{ (x, y) \frac{0}{i}, (x, y) \frac{k}{i}, T(TTE), (N1, N2); ti \right\}. \quad (13)$$

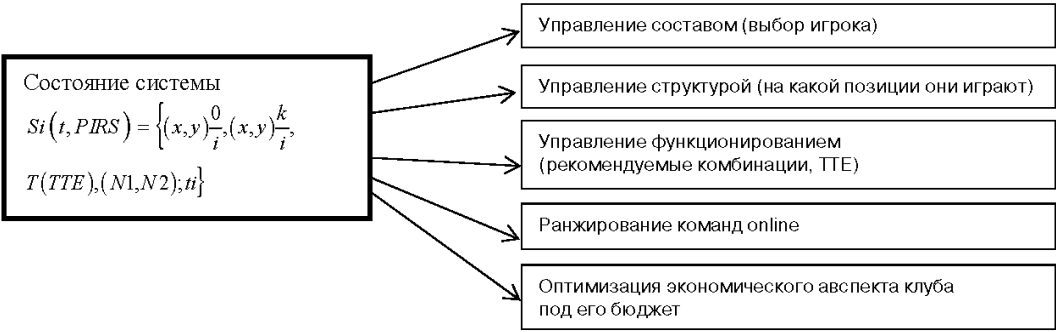


Рис. 3. Вектор управления
И с т о ч н и к: выполнено А.А. Полозовым

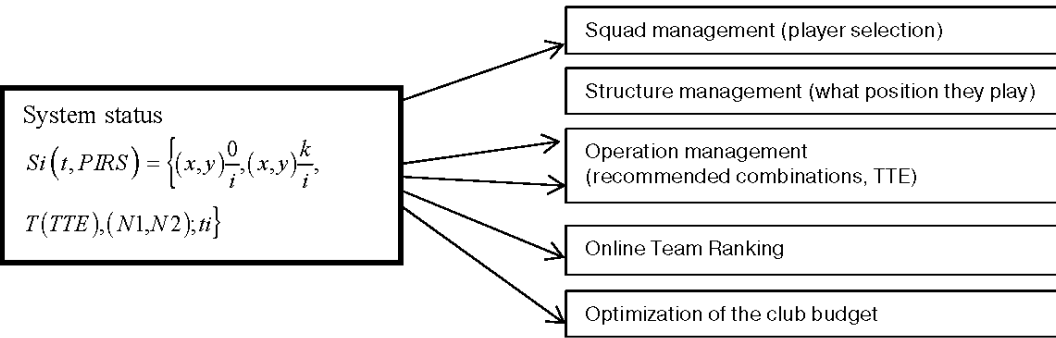


Figure 3. Control vector
S o u r c e: made by A.A. Polozov

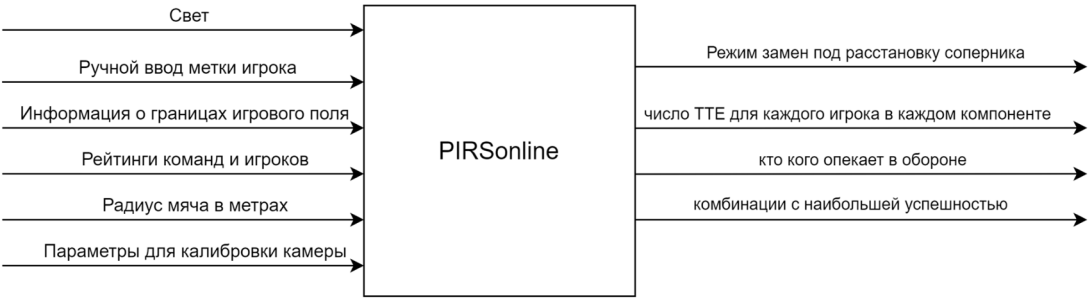


Рис. 4. «Черный ящик» модели PIRS
И с т о ч н и к: выполнено Н.А. Мальцевой

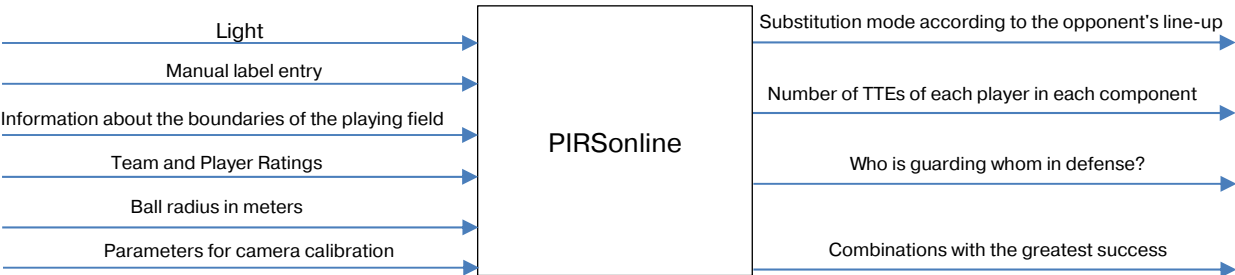


Figure 4. The PIRS model “black box”
S o u r c e: made by N.A. Maltseva

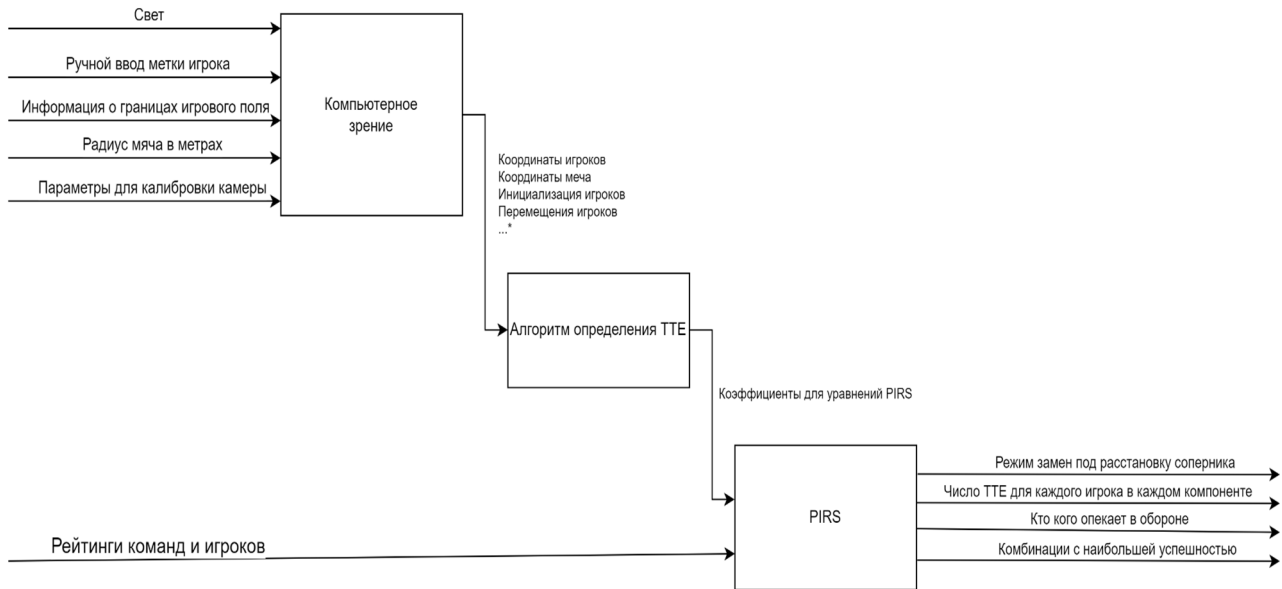


Рис. 5. Подсистемы модели PIRS
Источник: выполнено Н.А. Мальцевой

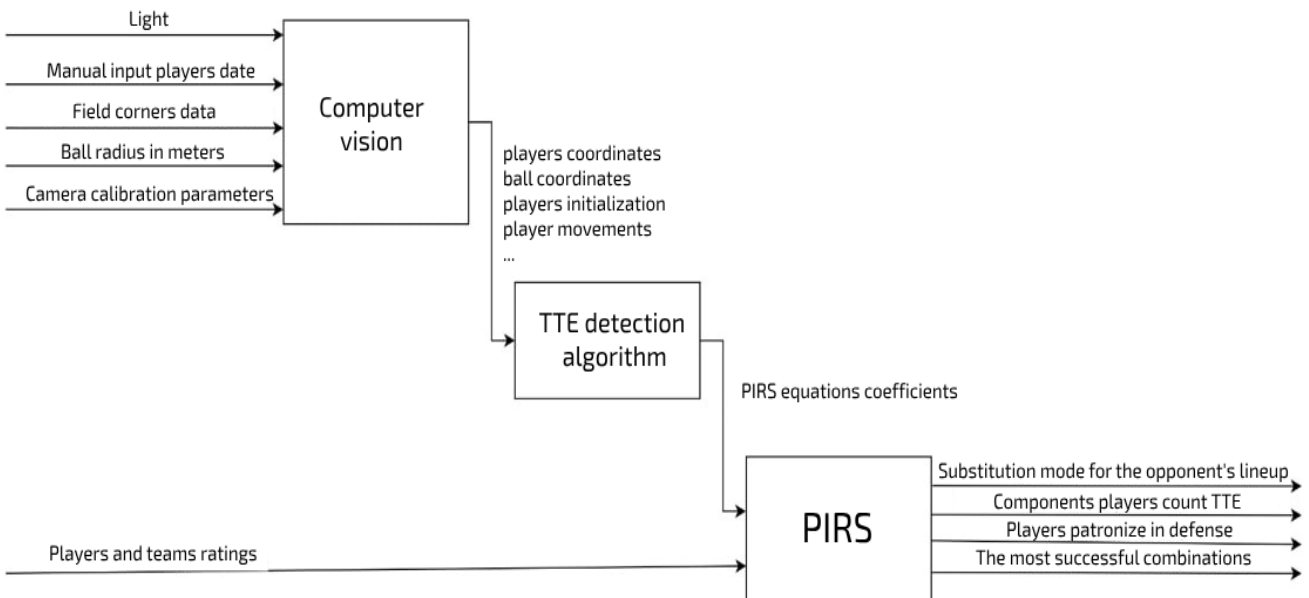


Figure 5. Subsystems of the PIRS model
Source: made by N.A. Maltseva

Цель проекта:

Структурирование работы по переходу от технологии PIRS в работе с командами топ-уровня к созданию системы PIRSONline.

Основные задачи проекта (рис. 3):

– определение границ системы, ее входов и выходов (рис. 4);

– разбиение системы на ее подсистемы (рис. 5);

– определение функций системы (рис. 6);

– определение компонентов системы (рис. 7);

– трассировка компонентов к реализуемым функциям.

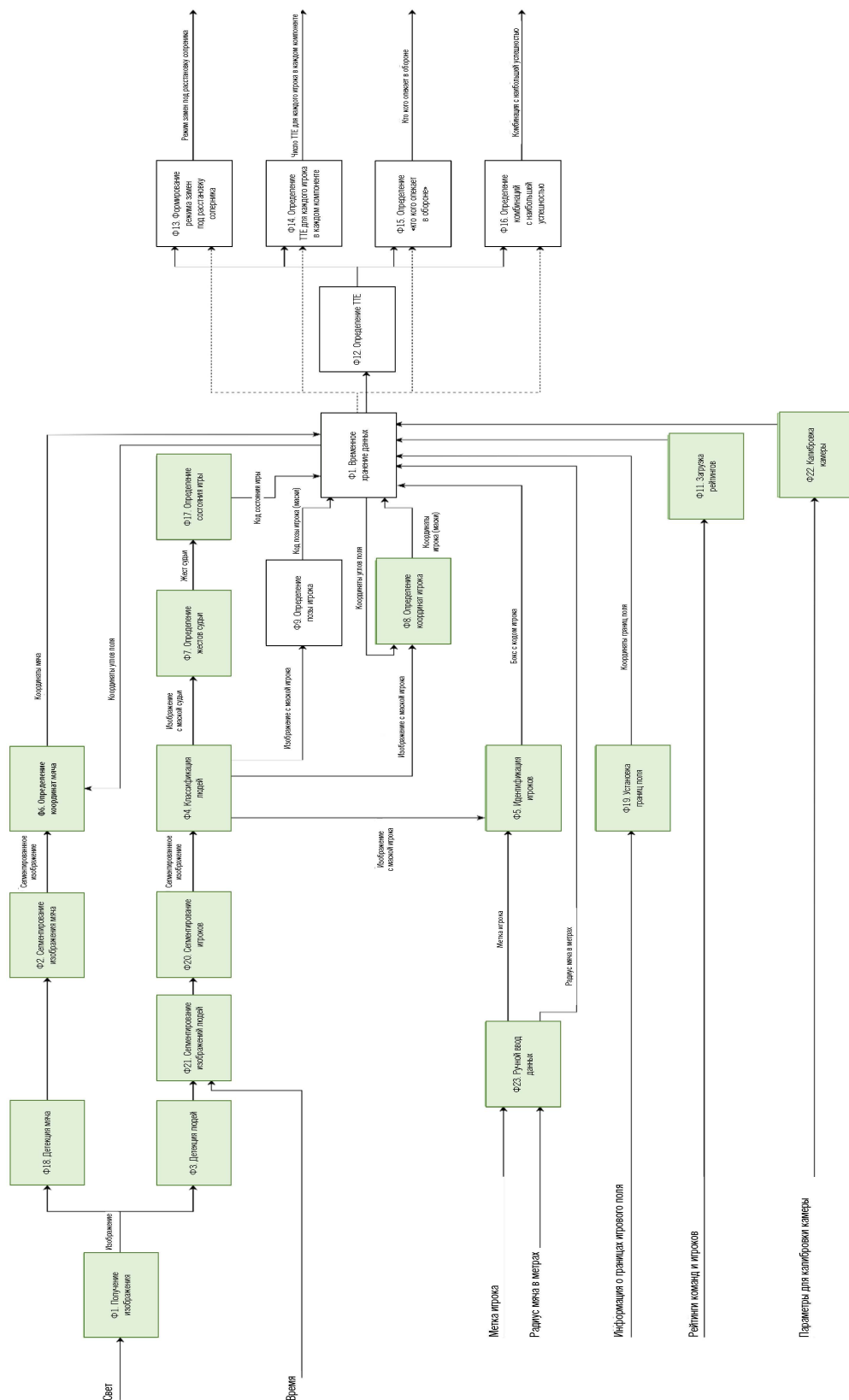


Рис. 6. Функциональная схема системы через ее декомпозицию.
Данные из элемента в виде изображений передаются, если меняется кадр
И с т о ч н и к : выполнено Н.А. Мальцевой

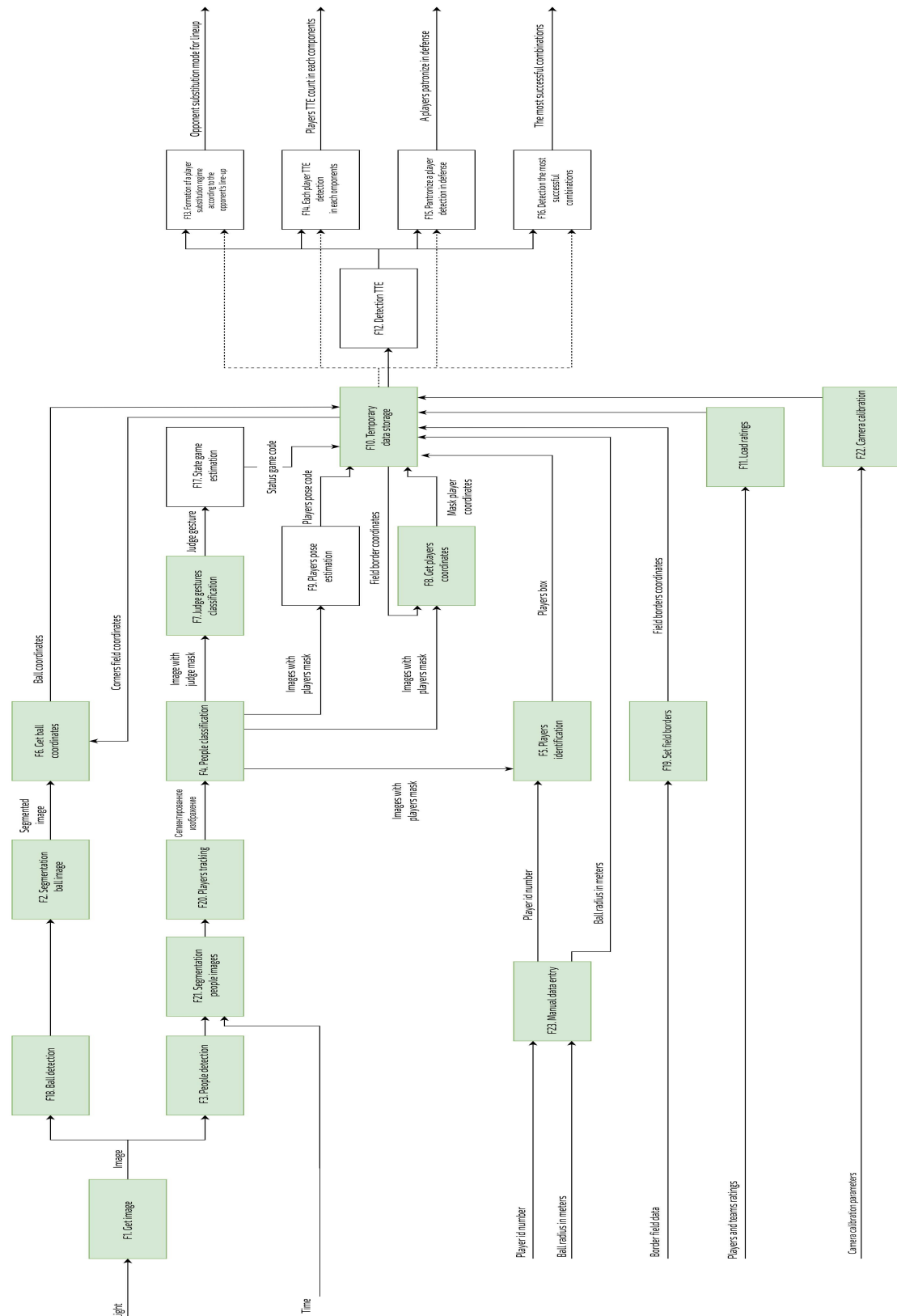


Figure 6. Functional diagram of the system through its decomposition.
Data from element to element in the form of images is transmitted if the frame changes
Source: made by N.A. Maltseva

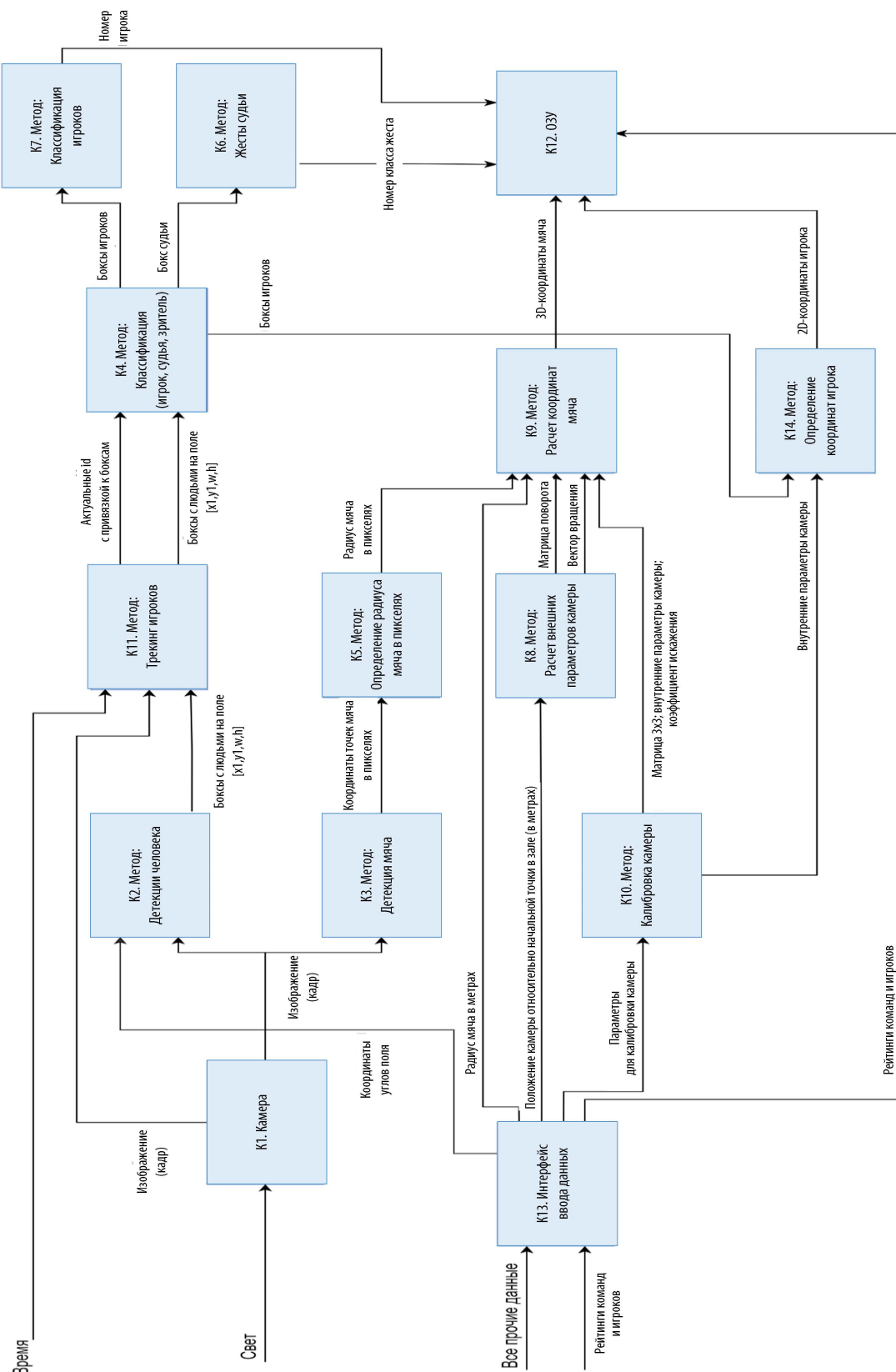


Рис. 7. Компонентная схема для приближения описания системы к более реальному прототипу
Источник: выполнено Н.А. Мальцевой

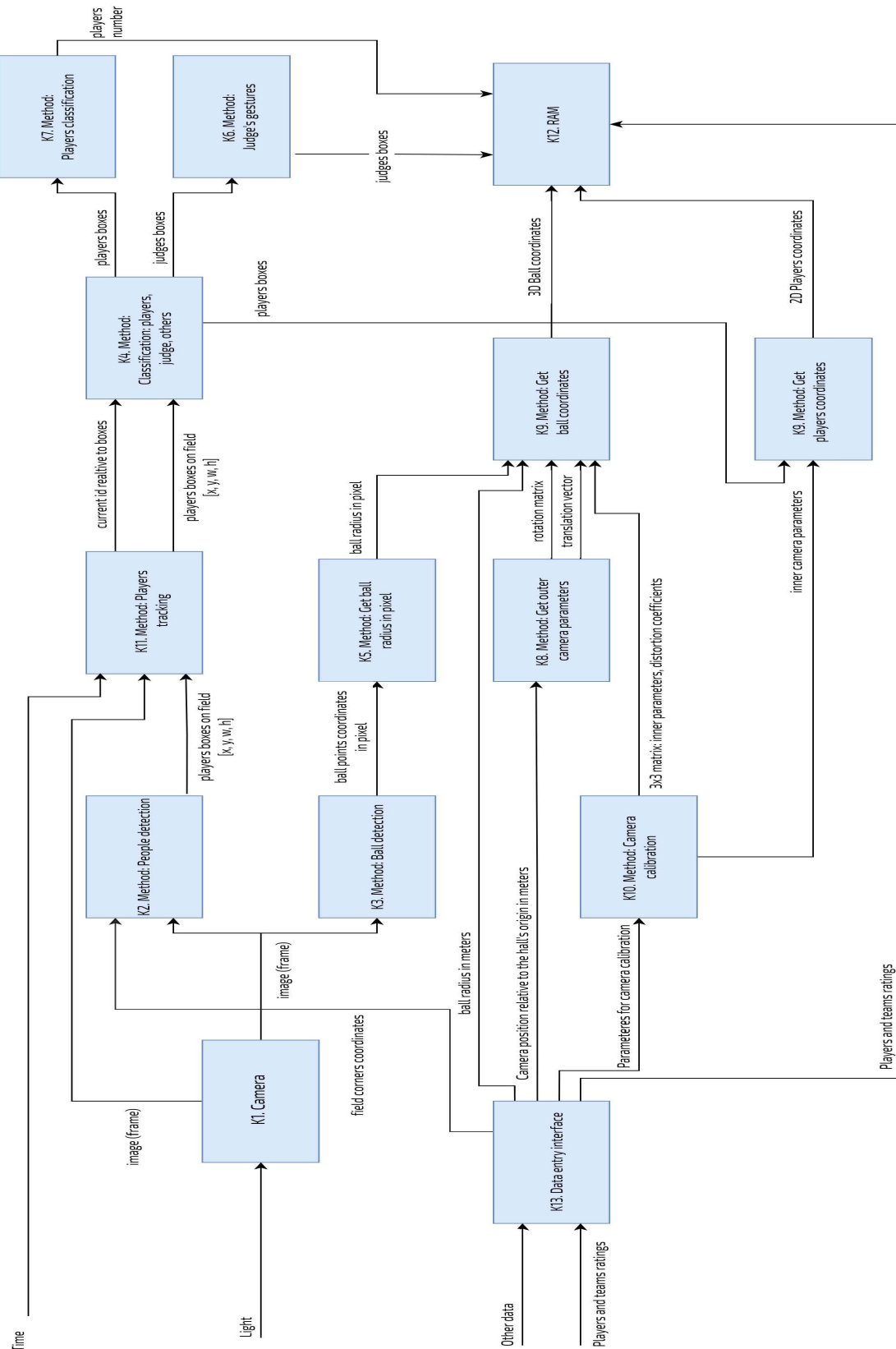


Figure 7. Component diagram to bring the system description closer to a more realistic prototype
 Source: made by N.A. Maltseva

3. Результаты

Представление системы как простой функции преобразования $f(x)$, ее входы и выходы.

Экспериментальная часть работы выполнялась в следующей последовательности.

1. *Получение изображения.* В систему управления спортивной командой данные об игре поступают с сетевой камеры HikvisionDS-2CD2087G2-LU (рис. 8), установленной в зале во время проведения соревнования. Полученные данные итеративно поступают и обрабатываются в последующих блоках с заданным интервалом.



Рис. 8. Камера HikvisionDS-2CD2087G2-LU
Источник: выполнено Н.А. Мальцевой

Figure 8. Hikvision DS-2CD2087G2-LU camera
Source: made by N.A. Maltseva

2. *Блок инициализации параметров игры.* Этот блок выполняется один раз в начале матча для задания постоянных значений, таких как параметры камеры, параметры поля, размер мяча. Эти значения хранятся в файле конфигураций в течение всего матча. К параметрам камеры относятся внутренние и внешние значения. Они необходимы для вычисления координат положения игроков и мяча на поле. К внутренним параметрам камеры, необходимым для пересчета 2D-координаты в 3D-координаты в системе координат камеры, относят матрицу камеры K , включающую f — фокусное расстояние в мм, установленное в настройках камеры как постоянное значение в рамках игры; d — плотность пикселей; w, h — размер сенсора:

$$K = \begin{bmatrix} d * f & 0 & \frac{w}{2} \\ 0 & d * f & \frac{h}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Также к внутренним параметрам относятся коэффициенты дисторсии, вычисленные на этапе калибровки камеры. Они позволяют корректировать значение координаты, устраняя искажение линзы. Внешние параметры камеры относятся к соотношению системы координат камеры к мировой системе координат, которая в системе управления рассматривается в рамках спортивного зала и содержат матрицу вращения и вектор трансляции, т. е. сдвиг камеры относительно начальной точки отсчета координат. В данном случае это нижний левый угол поля.

3. *Детекция мяча.* К параметрам поля относятся 8 опорных точек (рис. 9) с заранее известными координатами относительно начальной точки отсчета и границы поля для игнорирования всех детекций мяча и игроков вне этой области. После того как кадр поступил на вход в информационную модель, он обрабатывается в блоке детектора мяча. На первом шаге изображение проходит процесс предобработки, состоящий из изменения размера изображения (1024, 1024) и нормализации значений пикселей в диапазоне $[0,1]$ по трем каналам.

После предпроцессинга данные подаются на вход в сегментационную нейронную сеть с заранее обученными параметрами для детекции мяча. Последний слой в данной сети заменен на полносвязанный, что позволяет классифицировать каждый пиксель по принадлежности к объекту детекции, создавая тем самым маску выделения границ объекта.

4. *Определение 3D-координат мяча.* Для вычисления координат достаточно одной перспективы вида части мяча¹. Объект задается 2D-координатами точек в плоскости кадра. Чтобы вычислить положение мяча в 3D-пространстве,

¹ Computer Vision in Fitness and Athletics. Voxel51. URL: <https://voxel51.com> (accessed: 21.02.2024).

достаточно минимум 5 таких точек, расположенных на границе объекта. Затем по уравнению эллипса

$$C_1 \times X^2 + C_2 \times X \times Y + C_3 \times Y^2 + C_4 \times X + C_5 \times Y + C_6 = 0 \quad (15)$$

вычисляются координаты, описывающие овальную фигуру вокруг заданных точек объекта методом минимизации отклонения от заданного уравнения. В нашем случае 2D-координаты объекта в плоскости кадра были получены на

выходе сегментационной сети на предыдущем шаге. Затем с помощью уравнения (15) проводится оптимизация точек для более точного описания эллипса, и эти координаты пересчитываются в систему координат камеры согласно внутренним параметрам камеры. За начало системы координат (далее — СК) спортивного зала, в которой считаются 3D-координаты игры, была принята точка поля в левом нижнем углу, относительно которой зафиксировали положение камеры по трем осям (рис. 9, 10).

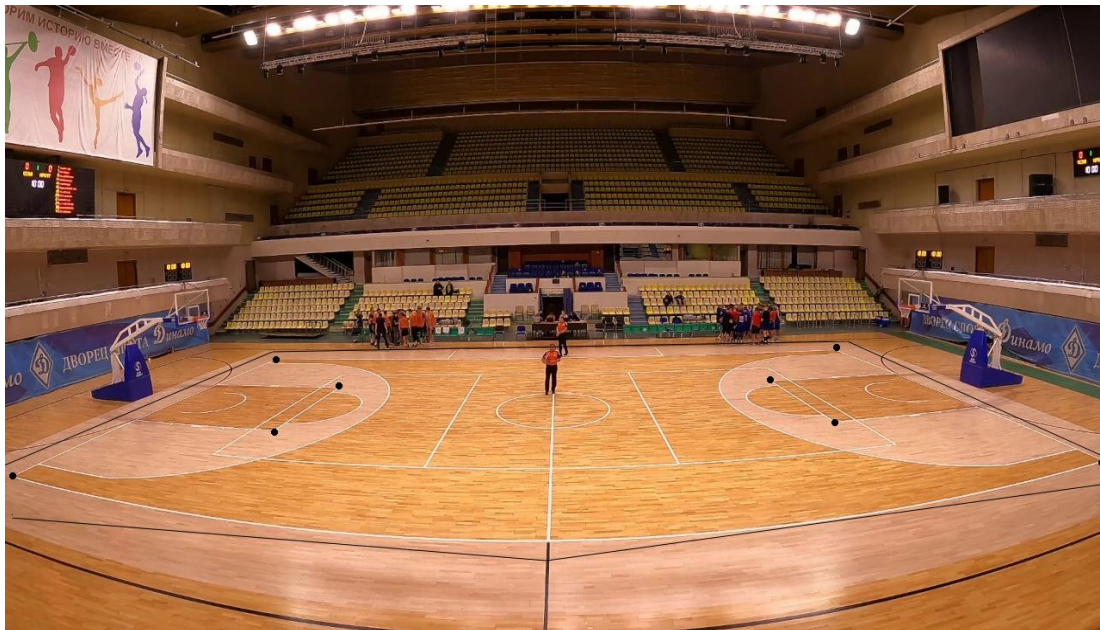


Рис. 9. Опорные точки и границы
Источник: выполнено Н.А. Мальцевой
Figure 9. Anchor points and boundaries
Source: made by N.A. Maltseva

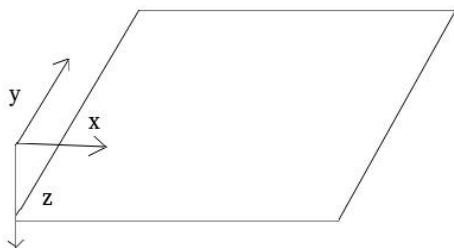


Рис. 10. СК зала, относительно которой фиксируется камера
Источник: выполнено Н.А. Мальцевой
Figure 10. SC of the hall relative to which the camera is fixed
Source: made by N.A. Maltseva

Зная координаты точки поля и камеры, была вычислена матрица вращения и вектор трансляции. Внешние параметры камеры необходимы для пересчета полученных координат из СК камеры в СК зала.

5. Детекция игроков. Детекция людей в выделенной области выполняется с помощью сегментационной модели нейронной сети YOLOv7, где человек описывается координатами маски по контуру фигуры. Эти данные поступают на вход в блок определения координат игроков на поле и в блок классификации «игрок и судья».

6. *Трекинг.* Каждый игрок на поле фиксируется не только своими координатами на поле, но и номером трека, который привязывается к нему в начале соревнования и сохраняется на протяжении всей игры. Если трек теряется, реидентифицировать игрока помогает номер на майке, его распознавание помогает привязать номер трека к конкретному игроку. В этом блоке в качестве входных данных выступают координаты игрока и его изображение, в качестве выходных данных — номер игрока. Игрок считается новым, если он ранее не был идентифицирован, использованный ранее, если это тот же игрок.

7. *Классификация игроков, зрителей и судей* (рис. 11).

8. *Определение позы игрока.* Для того чтобы распознать ТТЕ на видео в момент времени i , недостаточно знать положение игра на поле. Необходима комбинация положения его рук и ног на кадре $i - 1$ и i . Модель OpenPose позволяет

определить координаты 5 точек человека в кадре (пик). Эти данные сохраняются в течение нескольких кадров и подаются в блок определения ТТЕ.



Рис. 11. Пример трех классов: судья, игрок, болельщик
И с т о ч н и к: выполнено Н.А.Мальцевой

Figure 11. Example of three classes: judge, player, fan
S o u r c e: made by N.A. Maltseva.

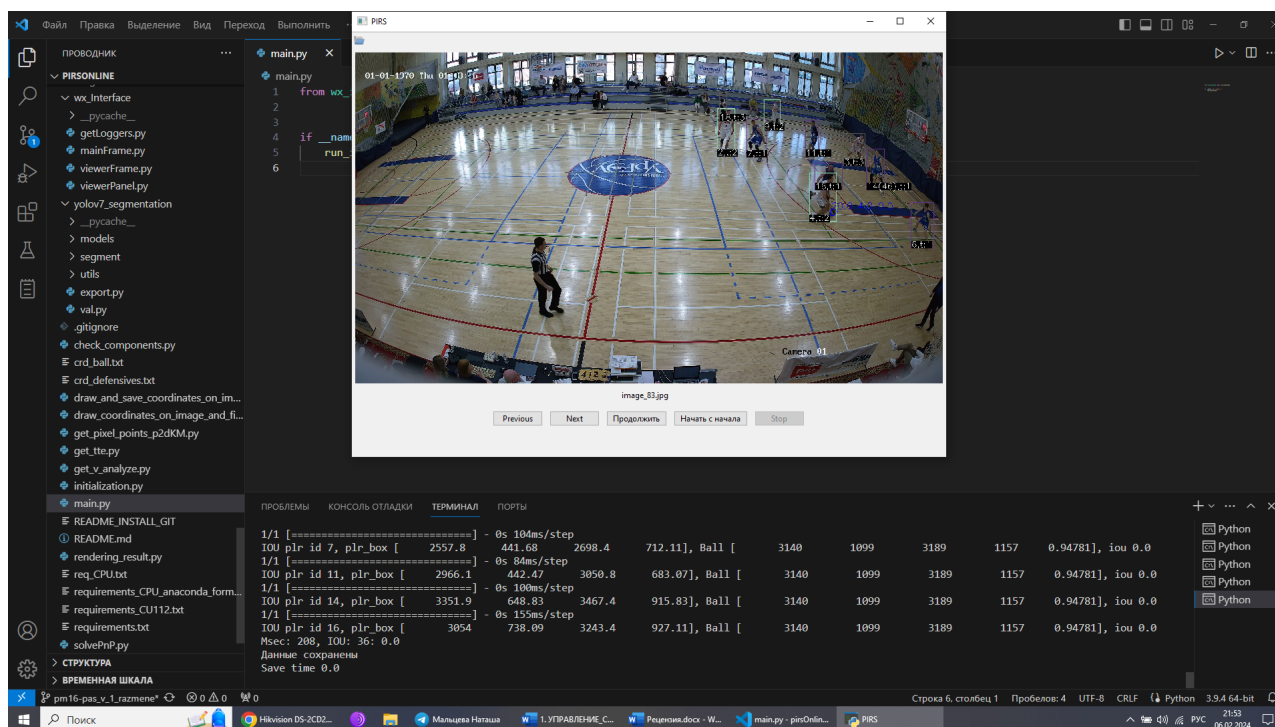


Рис. 12. Итоговый результат компьютерного зрения для PIRSONLINE
И с т о ч н и к: выполнено Н.А. Мальцевой

Figure 12. Final computer vision result for PIRSONLINE
S o u r c e: made by N.A. Maltseva

9. В итоге предыдущих шагов мы получили координаты игроков и мяча в игровом пространстве. Это позволило нам определить все индикаторы, необходимые для подключения технологии PIRS:

- индекс мяча и игроков;
- владение мячом;
- реализация голевого момента (мяч в корзине);
- скорость перемещения игроков и мяча;
- размен игроков (кто кого опекает);
- расстановку по позициям на поле;
- отличие простого технического действия от единоборства;
- ведение счета матча, время матча;
- определение по жестам судьи фолла, остановки игры, замены;
- определение технико-тактических единоборств;
- определение обоих участников единоборства;
- определение рейтингов игроков в матче;
- определение утомляемости игроков по динамике рейтингов;
- определение потери мяча;
- выявление эффективности различных комбинаций.

В результате получено решение с детекцией всех участников матча, мяча и др. (рис. 12).

Заключение

Полученная нами система отличается комплексным подходом. В ней организованы подсистемы выполняющие функции детекции объектов, перевода найденного объекта в систему координат зала, распознавания ТТД, анализа рейтинга и подсказки тренеру в онлайн-режиме.

Технология PIRS использовалась в работе со сборной России по мини-футболу с 2010 по 2018 г., что позволило команде перейти с пятого места в мировом рейтинге на первое. В этой технологии задача управления командой топ-уровня состоит в том, чтобы подобрать параметры управления и их значения, позволяющие добиться максимального счета предстоящего матча. Однако дальнейшее развитие технологии

PIRS требует ее трансформации в онлайн-режим. Полученная нами комплексная система состоит из нескольких подсистем, каждая из которых была адаптирована под технологию PIRS с учетом работы в онлайн-режиме. В результате было сформировано несколько подсистем.

1. *Детекция и трекинг игроков и мяча.* В этой части система применяет методы компьютерного зрения для детектирования и трекинга игроков и мяча на поле. Используется сегментационная нейронная сеть, а также алгоритмы трекинга, основанные на Kalman-фильтре.

2. *Определение 3D-координат.* Система использует методы реконструкции для определения 3D-координат мяча и игроков. Это позволяет более точно отслеживать их положение на поле и анализировать движения.

3. *Классификация игроков, зрителей и судей.* Система использует алгоритмы машинного обучения для классификации объектов на поле, таких как игроки, зрители и судьи. Это позволяет системе игнорировать ненужные объекты и фокусироваться на игроках.

4. *Определение позы игрока.* Система использует модель OpenPose для определения позы игрока на видео. Благодаря этой модели система распознает различные типы ТТД игроков.

5. *Оценка ТТЕ.* Система использует алгоритмы машинного обучения для оценки ТТЕ игроков. Это позволяет системе количественно оценивать эффективность действий игроков и команды в целом.

6. *Визуализация данных.* Система представляет результаты анализа в виде интерактивных визуализаций. Это дает возможность тренерам и другим заинтересованным лицам легко и удобно просматривать и анализировать данные.

Сформированная в итоге трассировки компонентов к реализуемым функциям последовательность задач по разработке информационной системы PIRSonline состоит из получения изображения, блока инициализации параметров игры, детекции мяча, определения 3D-координат мяча, детекции игроков, трекинга, классификации игроков и судей, определения позы игрока.

Разработанная информационная система PIRSonline:

– обеспечивает комплексный подход к онлайн-управлению соревновательной деятельностью команд топ-уровня;

– использует передовые методы компьютерного зрения и машинного обучения для выполнения своих функций;

– представляет результаты анализа в виде интерактивных визуализаций, что облегчает обработку.

Система PIRSonline представляет собой перспективный инструмент для онлайн-управления соревновательной деятельностью команд топ-уровня.

Список литературы

1. Морозов Ю.А., Бесков К.И. Анализ технико-тактической деятельности футболистов на 10 чемпионате мира // Подготовка футболистов. Москва : Физкультура и спорт, 1977. С. 134–155.

2. Голденко Г.А. Индивидуальные программы технико-тактической подготовки футболистов высокой квалификации с учетом особенностей соревновательной деятельности: автореф. дис. ... канд. пед. наук. Москва, 1984. 21 с.

3. Федотова Е.В., Сарсания С.К., Скотникова А.В. Оценка соревновательной нагрузки и разработка средств специальной подготовки спортсменов в хоккее на траве с использованием мониторов сердечного ритма // Теория и практика физической культуры. 2006. № 3. С. 23–26.

4. Годик М.А. Контроль в процессе спортивной тренировки / Подготовка футболистов. Москва : Физкультура и спорт, 1978. 114 с.

5. Платонов В.Н. Система подготовки спортсменов в олимпийском спорте: общая теория и ее практические приложения. Киев : Олимпийская литература, 2004. 808 с.

6. Поливаев А.Г. Автоматизированная система оценки коэффициента полезности игрока в мини-футболе // Омский научный вестник. 2015. № 4 (141). С. 219–224. EDN: UKTYCT

7. Beetz M., Hoynigen-Huene N.V., Kirchlechner B., Gedikli S., Siles F., Durus M., Lames M. ASPOGAMO: Automated Sports Games Analysis Models // International Journal of Computer Science in Sport. 2009. Vol. 8. No. 1. P. 1–21.

8. Полозов А.А., Краев М.В., Ролис А.В. Целесообразность статистики технико-тактических действий в футболе на примере компании Wyscout // Теория и практика физической культуры. 2021. № 1. С. 82–84. EDN: PXLEBP

9. Шурманов Е.Г., Полозов А.А., Михряков С.В., Божко Е.М. Оценка реализации голевых моментов в игровом виде спорта // Теория и практика физической культуры. 2018. № 1. С. 66–68. EDN: ZXMHXJ

10. Полозов А.А., Краев М.В., Газимова З.Ф. Информационная модель футбола на примере участия сборной России на ЧМ 2018 // Человек. Спорт. Медицина. 2018. Т. 18. № 1. С. 138–148.

11. Naik B.T., Hashmi M.F., Bokde N.D. A Comprehensive Review of Computer Vision in Sports: Open Issues, Future Trends and Research Directions // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Issue 9. P. 4429. <https://doi.org/10.3390/app12094429>

12. Blond A. Computer Vision in Sports: Revolutionizing Performance Analysis // Blog Requestum. 11.2020. URL: <https://requestum.com/blog/computer-vision-in-sports> (accessed: 21.02.2024).

13. Korol S. Computer Vision in Sports: People Train and Compete — Machines Watch and Help // OpenCV Blog 2024. URL: <https://www.opencv.ai/blog/computer-vision-in-sports> (accessed: 21.02.2024).

14. Boesch G. Automatic Refereeing and AI in Sports // Viso.ai Blog. 2024. URL: <https://viso.ai/applications/visual-ai-in-sports/> (accessed: 21.02.2024).

15. Oldham K.M., Chung P.W.H., Edirisinghe E.A., Halkon B.J. Experiments in the Application of Computer Vision for Ball and Event Identification in Indoor Sports // Computational Intelligence in Information Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing / ed. by S. hon-Amnuaisuk, T. Au Springer Publ.; 2015. Vol. 331. P. 275–284. http://doi.org/10.1007/978-3-319-13153-5_27

16. Akyildiz Z., Nobari H., González-Fernández F., Praça G.M., Sarmiento H., Guler A.H., Saka E.K., Clemente F.M., Figueiredo A.J. Variations in the physical demands and technical performance of professional soccer teams over three consecutive seasons // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. P. 2412. <http://doi.org/10.1038/s41598-022-06365-7>

17. Kovalchik S.A. Player Tracking Data in Sports // Annual Review of Statistics and Its Application. 2023. Vol. 10. P. 677–697. <https://doi.org/10.1146/annurev-statistics-033021-110117>

18. AWS “AI-Powered Sports Analytics: Enhancing Team Performance” // AWS Sports Journal. 2024. URL: <https://aws.amazon.com/ru/sports/performance-analytics/> (accessed: 21.02.2024).

References

1. Morozov YuA, Beskov KI. Analysis of technical and tactical activities of football players at the 10th World Championship. *Training of football players*. Moscow: Fizkul'tura i sport Publ.; 1977. P. 134–155. (In Russ.)

2. Goldenko GA. *Individual programs of technical and tactical training of highly qualified football players taking into account the peculiarities of competitive activity: Abstract of Cand. Sci. (Pedagogical Sciences) Dissertation*. Moscow; 1984. (In Russ.)
3. Fedotov E.V. et al. Evaluation of competitive load and development of means of special training of female athletes in field hockey using heart rate monitors. *Theory and Practice of Physical Education*. 2006;(3):23–26. (In Russ.)
4. Godik M.A. *Control during sports training. Training of football players*. Moscow: Fizkul'tura i sport Publ.; 1978. (In Russ.)
5. Platonov VN. *The system of training athletes in Olympic sports: General theory and its practical applications*. Kyiv: Olympic Literature Publ.; 2004. (In Russ.)
6. Polivaev AG. Automated system for assessing the utility coefficient of a player in mini-football. *Omsk Scientific Bulletin*. 2015;4(141):219–224. (In Russ.) EDN: UKTYCT
7. Beetz M, Hoyningen-Huene NV, Kirchlechner B, Gedikli S, Siles F, Durus M, Lames M. ASPOGAMO: Automated Sports Games Analysis Models. *International Journal of Computer Science in Sport*. 2009;8(1):1–21.
8. Polozov AA, Kraev MV, Rolis AV. Feasibility of statistics of technical and tactical actions in football on the example of the Wyscout company. *Theory and practice of physical education*. 2021;(1):82–84. (In Russ.) EDN: PXLEBP
9. Shurmanov EG, Polozov AA, Mehryakov SV, Bozhko EM. Evaluation of the implementation of goal chances in a game sport. *Theory and practice of physical education*. 2018;(1):66–68. (In Russ.)
10. Polozov AA, Kraev MV, Gazimova ZF. Information model of football on the example of participation of the Russian national team at the 2018 World Cup. *Human. Sport. Medicine*. 2018;18(1):138–148. (In Russ.)
11. Naik BT, Hashmi MF, Bokde ND. A Comprehensive Review of Computer Vision in Sports: Open Issues, Future Trends and Research Directions. *Applied Sciences*. 2022; 12(9):4429. <https://doi.org/10.3390/app12094429>
12. Blond A. Computer Vision in Sports: Revolutionizing Performance Analysis. *Blog Requestum*. 11.2020. Available from: <https://requestum.com/blog/computer-vision-in-sports> (accessed: 21.02.2024).
13. Korol S. Computer Vision in Sports: People Train and Compete — Machines Watch and Help. *OpenCV Blog*. 2024. Available from: <https://www.opencv.ai/blog/computer-vision-in-sports> (accessed: 21.02.2024).
14. Boesch G. Automatic Refereeing and AI in Sports. *Viso.ai Blog*. 2024. Available from: <https://viso.ai/applications/visual-ai-in-sports/> (accessed: 21.02.2024).
15. Oldham KM, Chung PWH, Edirisinghe EA, Hal-kon BJ. Experiments in the Application of Computer Vision for Ball and Event Identification in Indoor Sports. In: BS Phon-Amnuaisuk, TW Au (eds.). *Computational Intelligence in Information Systems SE – 27. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer Publ.; 2015. P. 275–284. http://doi.org/10.1007/978-3-319-13153-5_27
16. Akyildiz Z, Nobari H, González-Fernández F, Praça GM, Sarmento H, Guler AH, Saka EK, Clemente FM, Figueiredo AJ. Variations in the physical demands and technical performance of professional soccer teams over three consecutive seasons. *Scientific Reports*. 2022;12:2412. <http://doi.org/10.1038/s41598-022-06365-7>
17. Kovalchik SA. Player Tracking Data in Sports. *Annual Review of Statistics and Its Application*. 2023;10: 677–697. <https://doi.org/10.1146/annurev-statistics-033021-110117>
18. AWS “AI-Powered Sports Analytics: Enhancing Team Performance”. *AWS Sports Journal 2024*. Available from: <https://aws.amazon.com/ru/sports/performance-analytics/> (accessed: 21.02.2024).

Сведения об авторах

Гольдштейн Сергей Львович, доктор технических наук, профессор кафедры технической физики, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 5951–7411, e-mail: s.l.goldshtein@urfu.ru

Полозов Андрей Анатольевич, доктор педагогических наук, профессор кафедры физической культуры, Институт физической культуры, социального сервиса и туризма, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 5234-6875, ORCID: 0000-0003-1729-3340; e-mail: a.a.polofov@mail.ru

Пануловская Наталья Владимировна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры информационных технологий и систем управления, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 1087-5428, ORCID: 0000-0001-7407-1491; e-mail: n.v.panulovskaia@urfu.ru

Мальцева Наталья Анатольевна, аспирант, преподаватель кафедры информационных технологий и систем управления, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 2647-1891, ORCID: 0009-0002-5270-0247; e-mail: natalia.maltseva.susu@gmail.com

Краев Максим Викторович, преподаватель кафедры физической культуры, Институт физической культуры, социального сервиса и туризма, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия; ORCID: 0000-0002-3724-8929; e-mail: kraev.antooz@yandex.ru

About the authors

Sergei L. Goldstein, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technical Physics, Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 5951-7411, e-mail: s.l.goldshtein@urfu.ru

Andrey A. Polozov, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor of the Department of Physical Education, Institute of Physical Culture, Sports and Youth Policy, Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 5234-6875, ORCID: 0000-0003-1729-3340; e-mail: a.a.polofov@mail.ru

Natalia V. Papulovskaya, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Technology and Management Systems, Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 1087-5428, ORCID: 0000-0001-7407-1491; e-mail: n.v.papulovskaia@urfu.ru

Natalya A. Maltseva, Postgraduate student, Lecturer at the Department of Information Technology and Management Systems, Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 2647-1891, ORCID: 0009-0002-5270-0247; e-mail: natalia.maltseva.susu@gmail.com

Maxim V. Kraev, Teacher of the Department of Physical Education, Institute of Physical Culture, Sports and Youth Policy, Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russia; ORCID: 0000-0002-3724-8929; e-mail: kraev.antooz@yandex.ru

