

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия
Юго-Западного
государственного
университета

Научный журнал

Том 28 № 2 / 2024



Proceedings
of the Southwest
State University

Scientific Journal

Vol. 28 № 2 / 2024



**Известия Юго-Западного
государственного университета
(Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)**

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1997 г.

До 2011 года журнал издавался под названием
«Известия Курского государственного технического университета».

Цель издания – публичное представление научно-технической общественности научных результатов фундаментальных, проблемно-ориентированных научных исследований в таких областях, как технология и оборудование механической и физико-технической обработки, сварка, роботы, мехатроника и робототехнические системы, управление в социальных и экономических системах, методы и системы защиты информации, информационная безопасность, автоматизация и управление технологическими процессами, строительные конструкции, теплоснабжение, вентиляция, газоснабжение и освещение, строительная механика.

В журнале публикуются оригинальные работы, обзорные статьи, рецензии и обсуждения, соответствующие тематике издания.

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

Целевая аудитория: научные работники, профессорско-преподавательский состав образовательных учреждений, экспертное сообщество, молодые ученые, аспиранты, заинтересованные представители широкой общественности.

Журнал придерживается политики открытого доступа. Полнотекстовые версии статей доступны на сайте журнала, научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU.

Журнал включен в перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора наук, кандидата наук по следующим научным специальностям:

Машиностроение и машиноведение: 2.5.4; 2.5.5; 2.5.8.

Строительство: 2.1.1; 2.1.3; 2.1.9.

Информатика, вычислительная техника и управление: 1.2.2; 2.3.1; 2.3.3; 2.3.4; 2.3.6.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Емельянов Сергей Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, чл.-кор. Российской академии архитектуры и строительных наук, Лауреат премии правительства РФ в области науки и техники, ректор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г.Курск, Россия)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Бобырь Максим Владимирович, д-р техн. наук, профессор;
Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Агеев Евгений Викторович, д-р техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Борзов Дмитрий Борисович, д-р техн. наук, доцент; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Бредихин Владимир Викторович, д-р экон. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г.Курск, Россия);

Булычев Всеволод Валериевич, д-р техн. наук, профессор; Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал (г. Калуга, Россия);

Бхатгачарья Сиддхартха, д-р философии (PhD), профессор, Университет Христа (Крайст), Бангалор, Индия;

Бьянко Лино, д-р философии (PhD), профессор, Университет архитектуры, строительства и геодезии (Мальта);

Димитров Любомир Ванков, д-р техн. наук, профессор, Технический университет Софии (г.София, Болгария);

Жусубалиев Жаныбай Турсунбаевич, д-р техн.наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Колчунов Виталий Иванович, д-р техн.наук, профессор, академик Российской академии архитектуры и строительных наук (Россия);

Кузнецов Сергей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Россия);

Кукарас Даниэль, д-р философии (PhD), профессор, факультет гражданского строительства, Нови-Садский университет (г.Суботица, Сербия);

Куц Вадим Васильевич, д-р техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Мещеряков Роман Валерьевич, д-р техн. наук, профессор, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (г. Москва, Россия);

Овчинников Виктор Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Московский политехнический университет (г. Москва, Россия);

Пановко Григорий Яковлевич, д-р техн. наук, профессор, Институт машиноведения Российской академии наук (г.Москва, Россия);

Петрешин Дмитрий Иванович, д-р техн. наук, профессор, Брянский государственный технический университет (г. Брянск, Россия);

Сизов Александр Семенович, д-р техн. наук, профессор, НИЦ ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ (г.Курск, Россия);

Смирнов Игорь Михайлович, д-р техн. наук, доцент, АО «Научно-исследовательский инженерный институт» (г. Балашиха, Россия);

Сотникова Ольга Анатольевна, д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (г.Воронеж, Россия);

Титов Виталий Семенович, д-р техн.наук, профессор, заслуженный деятель науки России, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Турков Андрей Викторович, д-р техн. наук, профессор, Орловский государственный университет им. И.С.Тургенева (г.Орел, Россия);

Щербаков Владимир Иванович, д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (г.Воронеж, Россия);

Яцун Сергей Федорович, д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки России, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия).

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Емельянов Сергей Геннадьевич (председатель), д-р техн.наук, профессор, чл.-кор. Российской академии архитектуры и строительных наук, Лауреат премии правительства РФ в области науки и техники, ректор, Юго-Западный государственный университет» (г.Курск, Россия)

Бертрам Торстен, д-р техн. наук, профессор, Институт теории управления и системного проектирования Технического университета (г. Дортмунд, Германия);

Грабовой Кирилл Петрович, д-р экон. наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (г. Москва, Россия);

Гриднев Сергей Юрьевич, д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (г.Воронеж, Россия);

Добрица Вячеслав Порфирьевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Ежов Владимир Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, Изобретатель СССР, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Ивахненко Александр Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Колмыков Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Колчунов Владимир Иванович, д-р техн.наук, профессор, член Российской академии архитектуры и строительных наук (Россия);

Кореневский Николай Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки России, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Латыпов Рашит Абдулхакович, д-р техн. наук, профессор, Московский политехнический университет (г.Москва, Россия);

Локтионова Оксана Геннадьевна, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия).

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Адрес учредителя, издателя и редакции:

305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94

Телефон: +7(4712) 22-25-26,

Факс: +7(4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (ПИ №ФС77-85895 от 04.09.2023).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

Префикс DOI:10.21869

Сайт журнала: <https://science.swsu.ru>

© Юго-Западный государственный университет, 2024



Материалы журнала доступны под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:

Полиграфический центр
Юго-Западного государственного
университета, 305040, г.Курск,
ул. 50 лет Октября, д. 94

Подписка и распространение:
журнал распространяется
по подписке.

Подписной индекс журнала 41219
в объединенном каталоге
«Пресса России».

Периодичность: четыре выпуска в год

Свободная цена

Оригинал-макет подготовлен Е.В. Мельник

Подписано в печать 25.06.2024.
Дата выхода в свет 02.07.2024. Формат 60x84/8.
Бумага офсетная. Усл.печ.л. 21,4.
Тираж 1000 экз. Заказ 23.

16+

Proceedings of the Southwest State University



Peer-reviewed scientific journal

Published since 1997

Before 2011

“Proceedings of the Kursk State Technical University”

These Proceedings present the results of scientific fundamental and applied research in such areas as mechanical technologies and equipment; machine building; physical and engineering processing of materials; welding; robotics, mechatronics and robot systems, management and administration of social and economic systems; information protection methods and systems; information security; production process automation and control; building structures; heat supply; ventilation; gas supply and lightning systems; construction mechanisms and machines.

The journal publishes scientific articles, critical reviews, reports and discussions in the above mentioned areas.

All papers are published free of charge.

Target readers are scientists, university professors and teachers, experts, young scholars, graduate and post-graduate students, stakeholders and interested public.

The Editorial Board of the journal pursues open access policy. Complete articles are available at the journal web-site and at eLIBRARY.RU.

The journal is included into the Register of the Top Scientific Journals of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation as a journal recommended for the publication of the findings made by the scientists working on a doctoral or candidate thesis in the following areas:

Mechanical engineering and machine science: 2.5.4; 2.5.5; 2.5.8.

Construction: 2.1.1; 2.1.3; 2.1.9.

Computer science, computer engineering and control: 1.2.2; 2.3.1; 2.3.3; 2.3.4; 2.3.6.

EDITOR-IN-CHIEF

Sergei G. Emelianov, Dr. of Sci. (Engineering), Correspondent Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, a Holder of the Russian Government Prize in the Field of Science and Engineering, Rector of the Southwest State University (Kursk, Russia)

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Maksim V. Bobyr, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

EDITORIAL BOARD

Yevgenii V. Ageev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Dmitry B. Borzov, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Vladimir V. Bredikhin, Dr. of Sci. (Economic), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Vsevolod V. Bulychiev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor; Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch (Kaluga, Russia);

Bhatgacharya Siddhartha, Doctor of Philosophy (PhD), Professor, Christ University (Christ), Bangalore, India;

Lino Bianco, Dr. of Sci. (Philosophy), Professor of IAA, Visiting Professor at University of Architecture, Civil Eng. and Geodesy (Sofia), Senior Lecturer, University of Malta (Malta);

Lyubomir V. Dimitrov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Technical University of Sofia (Sofia, Bulgaria);

Zhanybaj T. Zhusubaliyev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Vitalii I. Kolchunov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Academician of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Russia);

Sergey N. Kuznetsov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

Danijel Kukaras, Associate Professor, PhD, University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering (Subotica, Serbia);

Vadim V. Kuts, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Roman V. Meshcheryakov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia);

Viktor V. Ovchinnikov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Moscow Polytechnic University (Moscow, Russia);

Grigorii Ya. Panovko, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia);

Dmitry I. Petreshin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Bryansk State Technical University (Bryansk, Russia);

Alexander S. Sizov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Igor M. Smirnov, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, JSC "Research engineering Institute» (Balashikha, Russia);

Olga A. Sotnikova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

Vitalii S. Titov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Andrey V. Turkov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Orel State University named after I.S. Turgenev (Orel, Russia);

Vladimir I. Shcherbakov, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

Sergey F. Yatsun, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

EDITORIAL COUNCIL

Sergei G. Emelianov, Chairman, Dr. of Sci. (Engineering), Correspondent Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, a Holder of the Russian Government Prize in the Field of Science and Engineering, Rector of the Southwest State University (Kursk, Russia)

Torsten Bertram, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Institute of Control Theory and System Design, Technical University of Dortmund (Dortmund, Germany);

Kirill P. Grabovoy, Dr. of Sci. (Economics), Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia);

Sergey Yu. Gridnev, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

Vyacheslav P. Dobritsa, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Vladimir S. Ezhov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Alexander G. Ivakhnenko, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Valerii I. Kolmykov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Vladimir I. Kolchunov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences Advisor (Russia);

Nikolay A. Korenevskii, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Rashit A. Latypov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Moscow Polytechnic University (Moscow, Russia);

Oksana G. Loktionova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia).

Founder and Publisher:

“Southwest State University”

Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

Phone: +7 (4712) 22-25-26,

Fax: +7 (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

The Journal is officially registered by:

The Federal Supervising Authority in the Field of Communication, Information Technology and Mass media
(ПИИ №ФС77-85895 от 04.09.2023).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

DOI Prefix: 10.21869

Web-site: <https://science.swsu.ru>

Printing office:

Printing Center

of the Southwest State University,
50 Let Oktyabrya str. 94,
Kursk 305040, Russian Federation

Subscription and distribution:

the journal is distributed by subscription.
Subscription index 41219
in the General Catalogue “Pressa Rossii”

Publication frequency: quarterly

Free price

Original lay-out design: E. Mel'nik

16+

© Southwest State University, 2024



Publications are available in accordance with the Creative Commons Attribution 4.0 License

Singed to print 25.06.2024.
Release date 02.07.2024. Format 60x84/8.
Offset paper. Printer's sheets 21,4.
Circulation 1000 copies. Order 23.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

Повышение эффективности демпфирования вибраций резцов	8
--	----------

Малыхин В. В., Новиков С. Г.

Математическое моделирование траекторного управления движением трёхколесного мобильного робота	20
---	-----------

Политов Е.Н., Мальчиков А.В., Звонарев И.А.

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

Методика определения требуемого соотношения мембранных напряжений в тентовой оболочке арочного типа	37
--	-----------

Чесноков А.В., Михайлов В.В.

Один из вариантов управления системой теплоснабжения зданий и сооружений с применением методов математического анализа	56
---	-----------

Жилина К. В., Тютюнов Д. Н., Бурцев А. П.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

Программная реализация иерархического подхода решения обратной задачи кинematики робота– манипулятора	71
--	-----------

Апокин Е. М., Хандожко В. А.

Оценка уязвимости протоколов обмена данными БПЛА для обеспечения повышения стабильности работы в нагруженных режимах	92
---	-----------

Черный С. Г., Зонтова Т.В., Шапаренко Н. В.

Разработка онтологической модели предметной области для обработки данных корпоративных хранилищ	114
--	------------

Халин Ю.А., Афанасьев А.А., Кудинов В.А.

Коррекция ошибок в ВЗУ ЭВМ с использованием STAIRCASE-кодов	134
--	------------

Егоров С.И., Киряев Ю.С., Локтионов Е.И., Титов В.С.

Интеллектуализация процесса детектирования форм геометрических объектов.....	148
---	------------

Милостная Н.А.

Построение интеллектуальных функций принадлежности и реализация нечетко-логического вывода на их основе	166
--	------------

Бобырь М.В., Бондаренко Б. А., Алтухов А. Ю.

К сведению авторов	184
---------------------------------	------------

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

Increasing the Efficiency of Vibration Damping of Cutters	8
--	----------

Malykhin V. V., Novikov S. G.

Mathematical Modeling of Trajectory Motion Control of a Three-Wheeled Mobile Robot	20
---	-----------

Polotov E. N., Malchikov A. V., Zvonarev I. A.

CONSTRUCTION

Original articles

Technique for Obtaining the Membrane Stress Ratio in a Fabric Arch-Type Shell	37
--	-----------

Chesnokon A. V., Mikhailov V. V.

One of the Options for Managing the Heat Supply System of Buildings and Structures Using Mathematical Analysis Methods	56
---	-----------

Zhilina K. V., Tyutyunov D. N., Burtsev A. P.

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

Software Implementation of a Hierarchical Approach to Solving the Inverse Problem of Kinematics of a Robot Manipulator	71
---	-----------

Apokin E. M., Khandozhko V. A.

Vulnerability Assessment of UAV Data Exchange Protocols to Ensure Increased Stability of Operation in Loaded Modes	92
---	-----------

Cherny S. G., Zontova T. V., Shaparenko N. V.

Development of an Ontological Model of the Subject Area for Corporate Storage Data Processing	114
--	------------

Khalin Y. A., Afanasyev A. A., Kudinov V. A.

Error Correction in the Computer Storage Using STAIRCASE Codes.....	134
--	------------

Egorov S. I., Kiryaev Y. S., Loktionov E. I., Titov V. S.

Intellectualization of the Process of Detecting Shapes of Geometric Objects	148
--	------------

Milostnaya N. A.

Intellectualization of the Process of Constructing Membership Functions and Implementation of Fuzzy Logical Inference Based on Them	166
--	------------

Bobyry M. V., Bondarenko B. A., Altukhov A. Yu.

Information of the authors	184
---	------------

УДК 621.929

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-8-19>



Повышение эффективности демпфирования вибраций резцов

В. В. Малыхин¹ ✉, С. Г. Новиков²

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

² Курский государственный аграрный университет им. И.И.Иванова
ул. Карла Маркса, д. 70, г. Курск 305009, Российская Федерация

✉ e-mail: malykhin1946@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Среди множества способов формообразования поверхностей, применяемых в машиностроении, существенную часть занимают процессы обработки деталей резанием в том числе точением. Процесс резания металлов в большинстве случаев сопровождается вибрациями и колебаниями инструмента, которые дестабилизируют обработку, уменьшают ее качество, стойкость инструмента и производительность процесса. Снизить негативное влияние вибрации возможно использованием элементов, поглощающих или снижающих колебания рабочей части инструмента. Известны конструкции резцов, называемых демпфирующими, способных уменьшить отрицательное влияние вибраций при точении. Однако основным их недостатком является жесткая связь с установочно-зажимными элементами станка, через которые передается вибрация на инструмент. Решение данной проблемы возможно совершенствованием конструкции инструмента с целью повышения устойчивости процесса резания. Конструкции токарных резцов, увеличивающих их стойкость, снижающих вибрации, возникающие в процессе резания, и повышающих качество обработанной поверхности представляют практический и научный интерес. Цель исследования состоит в создании инновационных моделей инструмента, в частности, токарных резцов, способных улучшить качество поверхностного слоя обрабатываемой детали, ее эксплуатационные свойства, а также стойкость режущей части инструмента.

Методы. Проектирование и изготовление новых резцов с державкой, которая имеет элементы, изолирующие рабочую часть резца от контакта с крепежной частью суппорта станка, а также различными жесткостями и размерами.

Результаты. Увеличение эффективности демпфирования колебаний резца, снижение его материалоемкости, т.к. размеры упругих элементов меньше половины длины державки резца, улучшение качества поверхностного слоя обрабатываемой детали, ее эксплуатационных свойств, а также стойкости режущей части инструмента.

Заключение. Предлагаемые демпфирующие резцы отвечают поставленным цели и задачам. Теоретические исследования и промышленные испытания, простота конструкций и технологий изготовления новых демпфирующих резцов позволяют рекомендовать их для внедрения в производство. Резцы могут применяться при токарной обработке различных конструкционных материалов.

Ключевые слова: резец; вибрации; демпфирующие полувставки; жесткость.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Малыхин В. В., Новиков С. Г. Повышение эффективности демпфирования вибраций резцов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №2. С. 8-19. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-8-19>.

Поступила в редакцию 30.11.2023

Подписана в печать 12.02.2024

Опубликована 25.06.2024

Increasing the efficiency of vibration damping of cutters

Vitaly V. Malykhin ¹ ✉, Sergey G. Novikov ²

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

² Kursk State Agrarian University named after I.I. Ivanov
70, Karl Marks str., Kursk 305009, Russian Federation

✉ e-mail: malykhin1946@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Among the many methods of surface shaping used in mechanical engineering, a significant part is occupied by the processes of processing parts by cutting, including turning. The process of cutting metals in most cases is accompanied by vibrations and oscillations of the tool, which destabilize the processing, reduce its quality, tool life and process productivity. It is possible to reduce the negative impact of vibration by using elements that absorb or reduce vibrations of the working part of the tool. There are known designs of cutters, called damping ones, that can reduce the negative impact of vibrations during turning. However, their main disadvantage is the rigid connection with the mounting and clamping elements of the machine, through which vibration is transmitted to the tool. This problem can be solved by improving the design of the tool in order to increase the stability of the cutting process. Designs of turning cutters that increase their durability, reduce vibrations that occur during the cutting process, and improve the quality of the machined surface are of practical and scientific interest. Purpose of research is to create innovative tool models, in particular turning cutters, that can improve the quality of the surface layer of the workpiece, its performance properties, as well as the durability of the cutting part of the tool.

Methods. Design and production of new cutters with a holder, which has elements that isolate the working part of the cutter from contact with the fastening part of the machine support, as well as various rigidities and sizes.

Results. Increasing the efficiency of damping vibrations of the cutter, reducing its material consumption, because the dimensions of the elastic elements are less than half the length of the cutter holder, improving the quality of the surface layer of the workpiece, its operational properties, as well as the durability of the cutting part of the tool. The cutters can be used for turning various structural materials.

Conclusion. The proposed damping cutters meet the stated goals and objectives. Theoretical studies and industrial tests, simplicity of designs and manufacturing technologies of new damping cutters allow us to recommend them for implementation in production. The cutters can be used for turning various structural materials.

Keywords: cutter; vibration; damping half-inserts; rigidity.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the

For citation: Malykhin V. V., Novikov S. G. Increasing the efficiency of vibration damping of cutters. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(2): 8-19 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-8-19>.

Received 30.11.2023

Accepted 12.02.2024

Published 25.06.2024

Введение

Среди множества способов формообразования поверхностей, применяемых в машиностроении, существенную часть занимают процессы обработки деталей резанием, в том числе точением. Процесс резания металлов в большинстве случаев сопровождается вибрациями и колебаниями инструмента, которые дестабилизируют обработку, уменьшают ее качество, стойкость инструмента и производительность процесса. Снизить негативное влияние вибрации возможно использованием элементов, поглощающих или снижающих колебания рабочей части инструмента. Известны конструкции резцов [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11], называемых демпфирующими, способных уменьшить отрицательное влияние вибраций при точении. Однако основным их недостатком является жесткая связь [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] с установочно-зажимными элементами станка, через которые передается вибрация на инструмент. Повысить устойчивость процесса резания уменьшением вибраций и колебаний возможно модернизацией конструкции инструмента.

Анализ и исследование новых видов токарных резцов с устройствами, которые увеличивают их стойкость, снижают вибрации, возникающие в процессе реза-

ния, и повышают качество обработанной поверхности, представляют практический и научный интерес [12].

Цель исследования состоит в создании инновационных моделей инструмента, в частности, токарных резцов, способных улучшить качество поверхностного слоя обрабатываемой детали, ее эксплуатационные свойства, а также повысить стойкость режущей части инструмента.

Материалы и методы

В настоящее время известны демпфирующие резцы [1-21], позволяющие уменьшить вибрации при точении. Однако, основным их недостатком является жесткая связь с установочно-зажимными элементами станка [1-14], через которые передается вибрация на инструмент. Решение данной проблемы возможно совершенствованием конструкции инструмента с целью повышения устойчивости процесса резания. Рассмотрим новые резцы с державкой, которая имеет элементы, изолирующие рабочую часть резца от контакта с крепежной частью суппорта станка, а также различными жесткостями и размерами упругих вставок.

Резец с державкой в упругих полувставках показан на рис. 1.

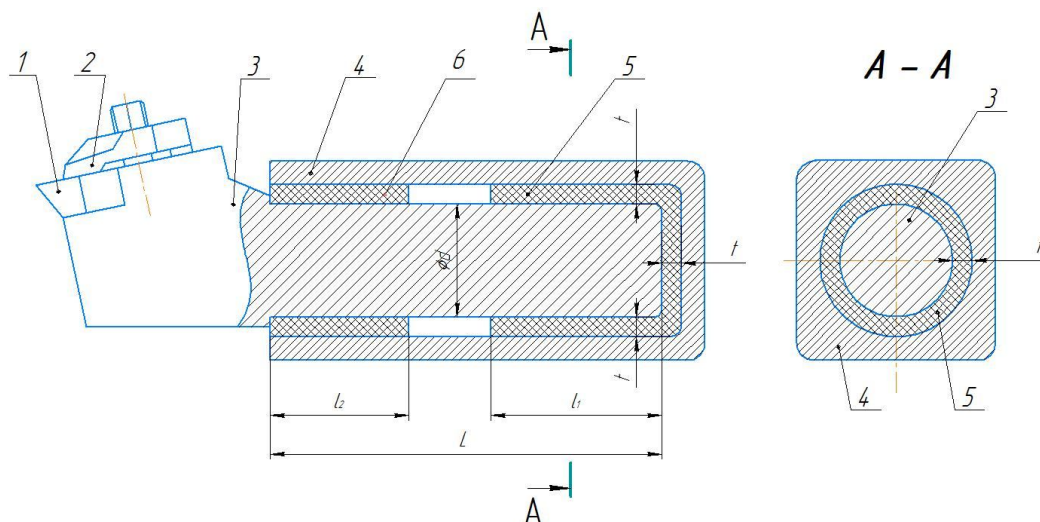


Рис. 1. Резец с демпфирующими полувставками различной жесткости: 1 – режущая пластина; 2 – узел крепления пластины; 3 – державка; 4 – стакан; 5, 6 – полувставки демпфирующие

Fig. 1. Cutter with damping half-inserts of varying rigidity: 1 – cutting plate; 2 – plate fastening unit; 3 – holder; 4 – glass; 5, 6 – damping half-inserts

В предлагаемом резце вставка сформирована из цилиндрических полувставок 5, 6 из материалов со свойствами высокого демпфирования различных жесткостей ($j_1 > j_2$), при этом размеры l_1 , l_2 полувставок 5, 6 меньше половины длины L выборки ($l_1 < L/2$, $l_2 < L/2$). Соответственно, в полувставках действуют восстанавливающие параллельные силы, направленные в противоположные стороны и не равные по модулю, при этом модули сил в полувставке 5 больше модулей сил в полувставке 6. Поэтому, кроме момента от пары сил, равных по модулю силам в полувставках 5 и 6, в полувставке 5 действуют еще силы, равные величине разности модулей сил в полувставках и создающие дополнительный восстанавливающий момент, что повышает эффектив-

ность демпфирования колебаний резца. Таким образом, происходит высокоэффективное демпфирование продольных, поперечных вибраций и ударных нагрузок, возникающих при точении, повышается устойчивость и надежность процесса резания. Подбором разных жесткостей материалов в полу вставках 5, 6 возможно минимизировать вибрации резца до необходимого уровня и достигнуть требуемого качества обработки.

Рассмотрим конструкцию универсального демпфирующего резца (УДР) со специальной вставкой [17, 18, 19, 20] на рабочей части (рис. 2). Державка УДР имеет глухое отверстие, в котором находится оправка с двумя полувставками, которые расположены вертикально с определенным зазором между ними, т.е. высота h_2 одной из них меньше высоты h_1 другой.

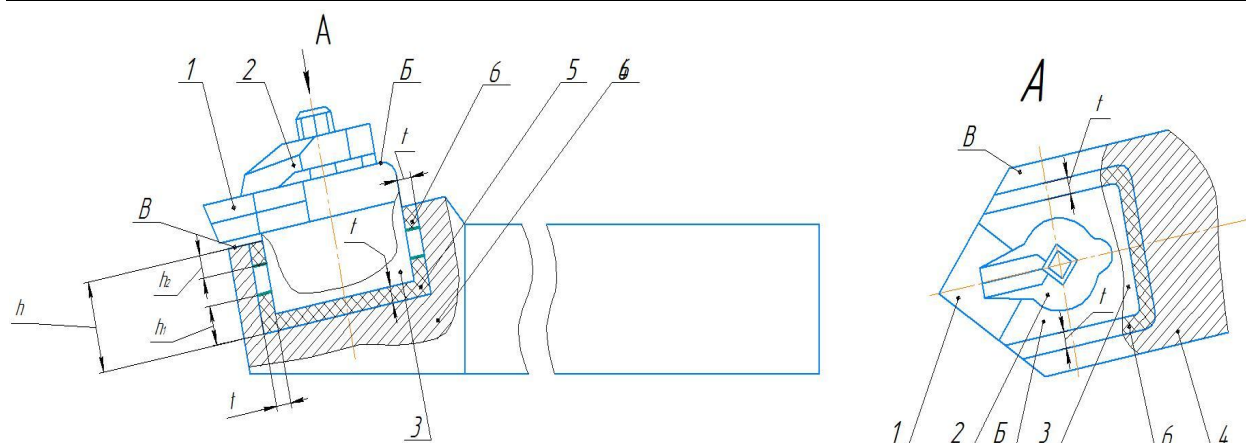


Рис. 2. Универсальный демпфирующий резец: 1 – режущая пластина; 2 – узел крепления пластины; 3 – оправка; 4 – державка; 5 – полувставка-подпятник; 6 – полувставка, меньшей жесткости

Fig. 2. Universal damping cutter: 1 – cutting plate; 2 – plate fastening unit; 3 – mandrel; 4 – holder; 5 – half-insert-thrust; 6 – half-insert, less rigid

Полувставки выполнены из материалов, способных гасить вибрации и обладающих разной жесткостью ($j_1 > j_2$). Полувставка 5 является подпятником, расположенным на дне отверстия, а вторая полувставка расположена на верхней части оправки 3. Высота полувставок 5 и 6 меньше половины глубины отверстия $h_1 < h_2 < h/2$. В процессе точения в подпятнике 5 и полувставке 6 появляются параллельные силы, направленные в противоположные стороны и неравные по модулю. Сила в подпятнике 5 больше модуля сил в полувставке 6, так как подпятник имеет большую жесткость. Поэтому, кроме момента от пары сил, равных по модулю силам в полувставке 6 [16, 17, 18], в подпятнике 5 действуют еще силы, равные величине разности модулей сил в подпятнике 5 и полувставке 6 и создающие дополнительный восстанавливающий момент, что повышает эффективность демпфирования ре-

жущей пластины 1. Таким образом, происходит высокоэффективное демпфирование продольных, поперечных вибраций и ударных нагрузок, возникающих в процессе резания. Подбором различных жесткостей материалов с высоким демпфированием в подпятнике 5 и полувставке 6 возможно минимизировать вибрации режущей пластины 1 до необходимого уровня и достигнуть требуемого качества обработки. Использование полувставок упрощает конструкцию резца и снижает его материалоемкость, так как нет необходимости в дополнительных конструкционных разработках для размещения конца оправки.

Результаты и их обсуждение

Были проведены испытания резцов стандартной и модифицированной конструкции при различных режимах обработки вала с целью выявления параметров шероховатости обработанной по-

верхности и определению значения собственных частот колебаний токарного резца. Для определения значения собственных частот колебаний токарных резцов был разработан стенд, состоящий из токарного станка, персонального компьютера; модуля общего назначения Е14-440; датчика колебаний ТУР KD 35.

Проверка работоспособности комплекса проведена путем точения вала из стали 40Х стандартным и демпфирующим резцом с пластиной из твердого сплава. Диапазон параметров режимов резания $V = 20 \dots 90$ м/мин; $S = 0,05 \dots 0,15$ мм/об; $t = 0,05 \dots 0,25$ мм.

Для количественной оценки вибрации рассматривались следующие ее параметры: двойная амплитуда (размах колебаний); виброускорение (виброперемещение), которое применяется при виброакустической диагностике и измеряется при наличии широкополосной вибрации, в диапазоне 100 -10000 Гц.

На рис. 3 представлены значения уровня вибрации в кодах АЦП. Как видно из рисунка амплитуда колебаний демпфирующего резца меньше стандартного на 15...20%. Похожий результат получается и при измерении виброускорений.

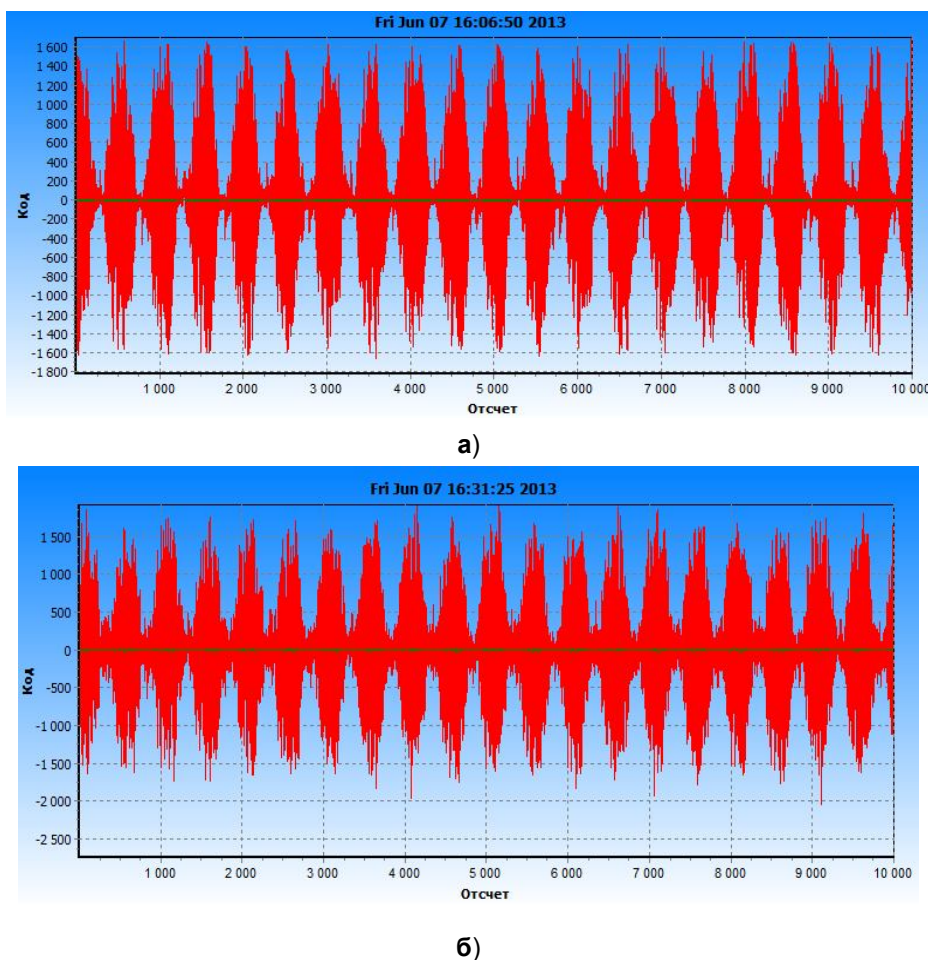


Рис. 3. Амплитуда вибраций стандартного (а) и модифицированного резца (б)

Fig. 3. Vibration amplitude of standard (a) and modified cutter (б)

По данным испытаний были построены графики зависимостей виброускорения и шероховатости обработан-

ной поверхности (R_a) от режимов резания (рис. 4, 5, 6).

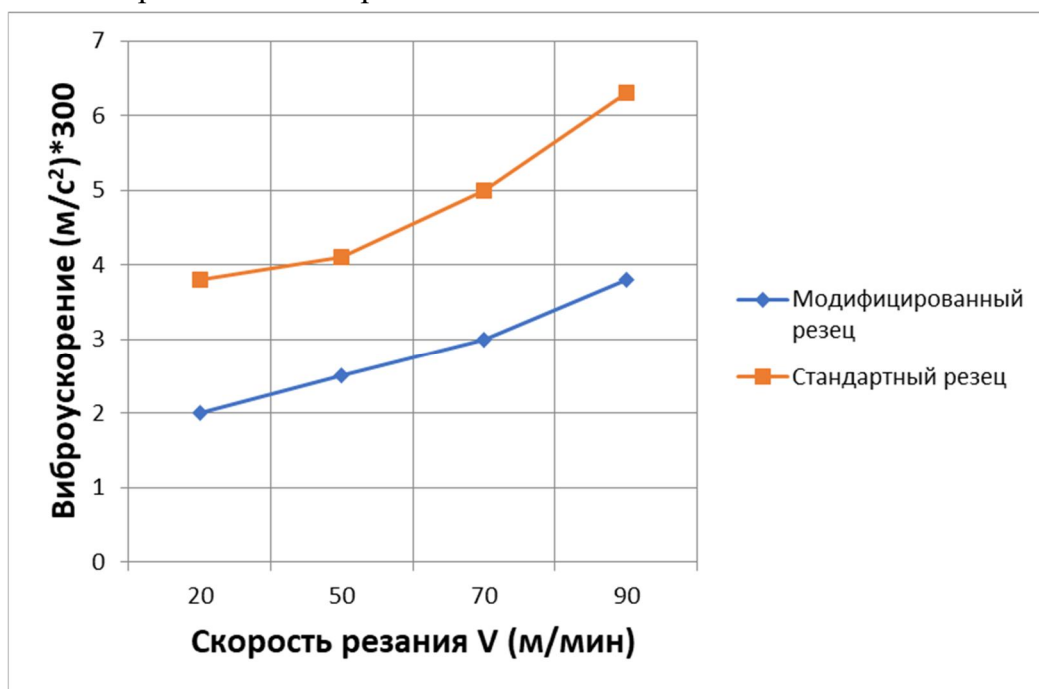


Рис. 4. Влияние скорости резания на величину виброускорения

Fig. 4. Effect of cutting speed on the magnitude of vibration acceleration

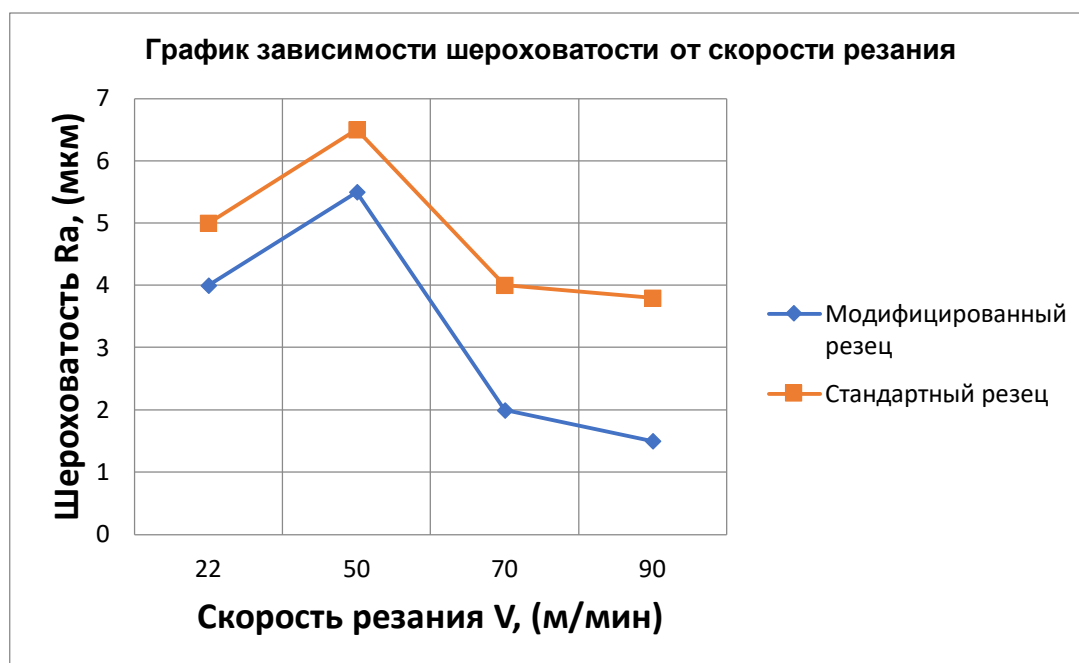


Рис. 5. Влияние скорости резания на шероховатость обработанной поверхности

Fig. 5. Effect of cutting speed on machined surface roughness

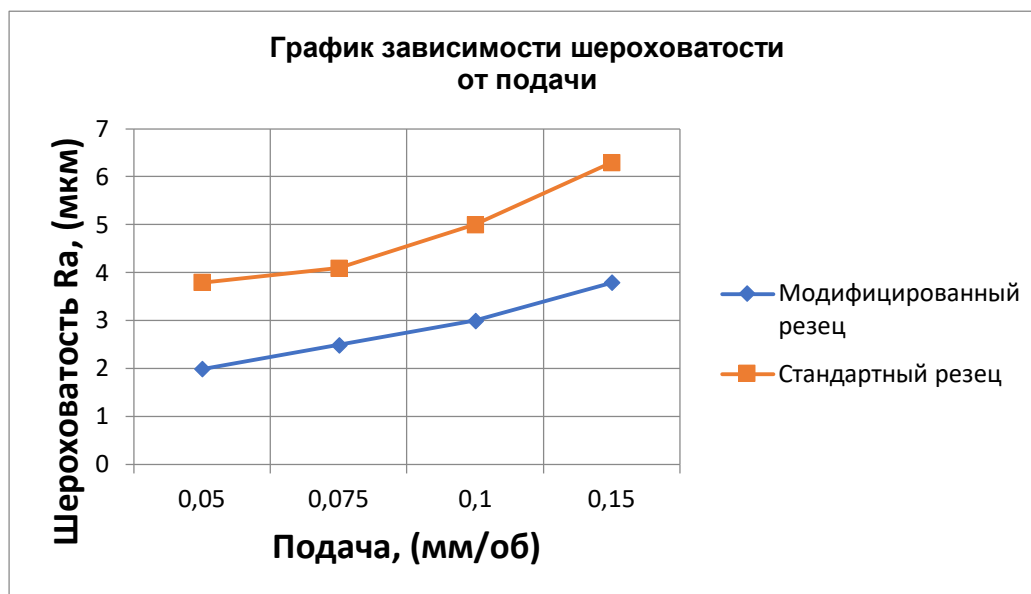


Рис. 6. Влияние подачи на шероховатость обработанной поверхности

Fig. 6. Effect of feed on machined surface roughness

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

- проведённые испытания показали эффективность виброизоляции и гашения вибраций по сравнению с обычным резцом без демпфирующих элементов;
- при точении демпфирующим резцом наблюдается улучшение качества обработанной поверхности и уменьшение ее шероховатости R_a на 20...40%;
- показатели вибрации при испытаниях новой конструкции резца снизились в среднем на 30% по отношению к стандартному резцу.

Таким образом, предлагаемые демпфирующие резцы позволяют достичь технического результата по повышению надежности устойчивого процесса резания и качества обработки за счет погашения вибраций и ударных нагрузок, возникающих в процессе резания.

Выводы

Рассмотренные конструкции инновационных моделей резцов позволяют:

1. Повысить качество обработки путем увеличения эффективности демпфирования колебаний резца за счет формирования вставки из двух полувставок, изготовленных из материалов, обладающих свойством высокого демпфирования и имеющих различные жесткости.

2. Снизить расход материала демпфирующей вставки, так как она состоит из двух размещенных на расстоянии друг от друга полувставок, при этом протяженности обеих полувставок меньше половины длины выборки конца державки. Это приводит к техническому результату по повышению качества обработки и снижению расхода материала вставки.

Предлагаемые демпфирующие резцы позволяют достичь повышения качества обработки, снизить их материалоемкость, а также стабилизировать процесс резания.

Список литературы

1. Патент №2009768 Российская Федерация: МПК⁵ B23B27/00/. Резец / Рогов В.А.; заявитель патентообладатель Российский университет дружбы народов. №5014352/08; заявл. 02.12.91; опубл. 30.03.94.
2. Патент №2280542 Российская Федерация: МПК⁷ B23B27/00/. Резец / Васин Л.А., Бородкин Н.Н.; заявитель патентообладатель ГОУ ВПО Тульский государственный университет (ТулГУ). 25.04.2005; опубл. 27.07.2006.
3. Патент №2287405 Российская Федерация: МПК B23B27/10/. Резец / Полежайкин Г.М., Ладоскин Н.А., Фомин А.Г. Полежайкин И.Г., Ефаньева Т.Г.; заявитель патентообладатель ГОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева». №2005 124 690/02; заявл. 02.08.2005; опубл. 20.11.2006.
4. Патент №2107588 Российская Федерация: МПК B23B27/16/. Резец / Войтенко В.Г., Е Татаркин.Ю., Ситников А.А.; заявитель патентообладатель Алтайский государственный университет. №96123454/02; заявл. 15.12.96; опубл. 27.03.98.
5. А.С. 1252062 СССР кл. B23B27/16. Сборный резец / Федоров В. Л., Копылова В.В., Дьякова Э.Н., патентообладатель Университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы. № 4932261/08 заявл. 11.03.91; опубл. 23.05.93, Бюл. № 19.
6. Инструментальное обеспечение процессов механической обработки твердыми сплавами и композитами / Е.И. Яцун, В.В. Малыхин, О.С. Зубкова, С.Г. Новиков. Курск, 2016. С.160-124.
7. Павлов Е.В., Смирнов И.М. О возможности применения резцов из композита при обработке поверхностей деталей, образованных сочетанием конструкционных материалов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 2(71). С. 91-98.
8. Иванов И.И., Воронов С.А. Исследование динамики процесса вибрационного сверления с управлением по размаху колебаний // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. Вып. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-9-1806>
9. Перевертов В.П., Авдонин Г. Т. Прогрессивные виброустойчивые конструкции металлорежущих инструментов // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза, 2006. Т.2.
10. Новиков С.Г., Малыхин В.В. Конструкция демпфирующего резца с переменной жесткостью по длине державки // Провинциальные научные записки. 2019. №2(10). С.61-64.
11. Новиков С.Г., Малыхин В.В. Разработка конструкции демпфирующего резца с варьированием жесткости по длине державки // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 1. С. 31-42. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-31-42>.

12. Малыхин В.В., Яцун Е.И., Новиков С.Г. Виброакустическая диагностика состояния режущего инструмента и микронеровностей обработанной поверхности // Справочник. Инженерный журнал. 2014. №14. С.31-35.

13. Патент №2457077 Российская Федерация: МПК В23В27/0. Демпфирующий резец / Новиков С.Г., Малыхин В.В., Яцун Е.И. [и др.]; заявитель патентообладатель ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ). № 2011 106 621/02; заявл. 22.02.2011; опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21.9 15.

14. Разработка конструкции экспериментального образца демпфирующего резца // В.В. Малыхин, Е.И. Яцун, С.Г. Новиков, А.А. Фадеев // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сборник научных трудов XI-ой Международной научно-практической конференции: в 4 т. Курск, 2014. Т. 4. С.234-238.

15. Разработка конструкций демпфирующих резцов / В.В. Малыхин, Е.И. Яцун, Ю.Н. Селезнев, С.Г. Новиков // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 11. С.25-27.

16. Патент №2457077 Российская Федерация: МПК В23В27/00. Демпфирующий резец с управляемой жесткостью / Новиков С.Г., Малыхин В.В., Яцун Е.И. и [др.]; заявитель патентообладатель ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ). № 2013113649/02; заявл. 26.03.2013; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34.

17. Демпфирующие резцы постоянной жесткости и упругой связью с системой «Станок-инструмент-деталь» / С.Г. Емельянов, В.В. Малыхин, Е.И. Яцун, С.Г. Новиков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып. 8. Ч.2. С.22-31.

18. Яцун Е.И., Малыхин В.В., Новиков С.Г. Разработка и исследование конструкций демпфирующих резцов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 8. Ч.1. С.287-296.

19. Патент №2479385 Российская Федерация: МПК В23В27/00. Демпфирующий резец с регулируемой жесткостью / Новиков С.Г., Малыхин В.В., Яцун Е.И. [и др.]; патентообладатель ФБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ). №2011141683/02; заявл. 13.10.2011. Оpubл. 20.04.2013, Бюл. №11.

20. Патент №2621939 Российская Федерация: МПК В23В27/00. Универсальный демпфирующий резец с управляемой жесткостью / Новиков С.Г., Малыхин В.В., Яцун Е.И. [и др.]; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ). № 2015116208/02. Заявл. 28.04.2015. Оpubл. 08.06.2017, Бюл. №16.

21. Патент №268650021 Российская Федерация: МПК В23В27/00. Демпфирующий резец / Новиков С.Г., Малыхин В.В., Волосухин В.А., Глаголев Р.В.; заявитель патентообладатель ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ). № 2018133445; заявл. 21.09.2018. Оpubл. 29.04.2019. Бюл. № 13.

References

1. Rogov V.A. Cutter. Russian Federation Patent. 2009768. 30 March 1994.
2. Vasin L.A., Borodkin N.N. Incisor. Russian Federation Patent 2280542. 27 July 2006.
3. Polezhaikin N.A., Ladoshkin A.G., Fomin L.A., Polezhaikin I.G., Efaneva T.G. Incisor. Russian Federation Patent 2287405. 11 November 2006.
4. Voitenko V.G., Tatarkin E.Yu., Sitnikov A.A. Incisor. Russian Federation Patent 2107588. 27 March 1998.
5. Fedorov V.L., Kopylova V.V., Dyakova E.N. Prefabricated cutter. A.S. 1252062 USSR class. B23B27/16. 03 November 1991.
6. Yatsun E.I., Malykhin V.V., Zubkova O.S. Novikov S.G. Tool support for mechanical processing processes with hard alloys and composites. Kursk, 2016. P.160-124. (In Russ.).
7. Pavlov E.V., Smirnov I.M. Applicability of Composite Cutters for Mashining Surfaces Formed by a Combination of Structural Materials, *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2017; 21 (2): 91-98 (In Russ.).
8. Ivanov I.I., Voronov S.A. Study of the dynamics of the vibration drilling process with control by the amplitude of vibrations. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*. 2018; is. 9. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-9-1806>
9. Perevertov V.P., Avdonin G.T. Progressive vibration-resistant designs of metal-cutting tools. In: *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo» = Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*. Penza, 2006; vol. 2. (In Russ.).
10. Novikov S.G., Malykhin V.V., Yatsun E.I. Design of a damping cutter with variable rigidity along the length of the holder. *Provintsial'nye nauchnye zapiski = Provincial Scientific Notes*. 2019. (1): 31-42. (In Russ.).
11. Novikov S.G., Malykhin V.V. Development of Damping Cutter Construction with Rigidity Variation on Holder Length. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019; 23(1): 31-42 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-31-42>
12. Malykhin V.V., Yatsun E.I., Novikov S.G. Vibroacoustic diagnostics of the condition of the cutting tool and microroughness of the machined surface. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal = Handbook. Engineering Journal*. 2014; (14): 31-35. (In Russ.)
13. Novikov S.G., Malykhin V.V., Yatsun E.I. [etc.]. Damping cutter. Russian Federation Patent 2457077. 27 July 2012.
14. Malykhin V.V., Yatsun E.I., Novikov S.G., Fadeev A.A. Development of the design of an experimental sample of a damping cutter. In: *Sovremennye instrumental'nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii: sbornik nauchnykh trudov XI-oi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Modern instrumental systems, information technolo-*

gies and innovations: collection of scientific papers of the XIth International Scientific and Practical Conference. Kursk, 2014. Vol. 4. Pp. 234-238. (In Russ.)

15. Malykhin V.V., Yatsun E.I., Seleznev Yu.N., Novikov S.G. Development of designs for damping cutters. *Khimicheskaya i neftegazovoe mashinostroenie = Chemical and oil and gas engineering*. 2016; (11): 25-27. (In Russ.).

16. Novikov S.G., Malykhin V.V., Yatsun E.I. et al. Damping cutter with controlled stiffness. Russian Federation Patent 2535196. 10 December 2014.

17. Emelyanov S.G., Malykhin V.V., Yatsun E.I., Novikov S.G. Damping cutters of constant rigidity and elastic connection with the “Machine-tool-part” system. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of Tula State University. Technical science*. 2017; is. 8, part 2: 22-31. (In Russ.)

18. Yatsun E.I., Malykhin V.V., Novikov S.G. Development and research of damping cutter designs. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of Tula State University. Technical science*. 2016; is. 8, part 1: 287-296. (In Russ.)

19. Novikov S.G., Malykhin V.V., Yatsun E.I. [etc.]. Damping cutter with adjustable rigidity. Russian Federation Patent 2479385. 20 April 2013.

20. Novikov S.G., Malykhin V.V., Yatsun E.I. [etc.]. Universal damping cutter with controlled rigidity. Russian Federation Patent 2621939. 08 June 2017.

21. Novikov S.G., Malykhin V.V., Volosukhin V.A., Glagolev R.V. Damping cutter. Russian Federation Patent 268650021. 29 April 2019.

Информация об авторах / Information about the Authors

Малыхин Виталий Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: malykhin1946@mail.ru

Vitaly V. Malykhin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Mechanical Engineering Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: malykhin1946@mail.ru

Новиков Сергей Георгиевич, кандидат технических наук, доцент, Курский государственный аграрный университет им. И.И.Иванова, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: novikov.s.46@mail.ru

Sergey G. Novikov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Kursk State Agrarian University named after I.I.Ivanov, Kursk, Russian Federation, e-mail: novikov.s.46@mail.ru

УДК 681.5

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-20-36>

Математическое моделирование траекторного управления движением трёхколесного мобильного робота

Е.Н. Политов ¹ ✉, А.В. Мальчиков ¹, И.А. Звонарев ¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: politovyevgeny@yandex.ru

Резюме

Цель. Повышение эффективности траекторного движения трехколесных роботов за счет разработки алгоритмов системы управления и подбора параметров на основании математического моделирования движения робота вдоль путевых точек, характеризующих требуемую траекторию движения. Разработка методов планирования траекторий трехколесного мобильного робота на основе алгоритма Pure Pursuit. Разработка математической модели устройства, позволяющей получить численное решение для управляемого движения робота по путевым точкам. Анализ результатов моделирования, с целью установления применимости предлагаемых решений для задач управления двухсекционным колесным роботом для ландшафтных работ.

Методы. В качестве основы при разработке системы управления траекторным движением робота используется алгоритм Pure Pursuit, позволяющий формировать траектории движения робота по путевым точкам с заданными параметрами движения. При разработке математической модели использовались методы теоретической механики, механики роботов, численного интегрирования, теории управления, электротехники и электромеханики. При создании программных продуктов использованы математические пакеты Matlab/Simulink.

Результаты. В результате проведенного исследования были обнаружены и подтверждены основные закономерности влияния параметра Lookahead Distance алгоритма траекторного движения Pure Pursuit на характер движения управляемого робота. Показано, что выбор величины данного параметра должен обосновываться задачами управления и условиями работы робота. Разработанная математическая модель позволила получить временные диаграммы для параметров движения робота, установить точность предлагаемых алгоритмов.

Заключение. В работе установлено, что предложенный в работе алгоритм Pure Pursuit может быть использован для осуществления траекторного управления колесных мобильных роботов. Метод не требует высокой производительности вычислительной системы и обеспечивает удовлетворительные качественные и количественные характеристики управления движением.

Ключевые слова: траекторное управление; алгоритм Pure Pursuit; трехколесный робот; кинематические характеристики движения; математическая модель.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет-2030».

Для цитирования: Политов Е.Н., Мальчиков А.В., Звонарев И.А. Математическое моделирование траекторного управления движением трёхколёсного мобильного робота // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №2. С. 20-36. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-20-36>.

Поступила в редакцию 12.02.2024

Подписана в печать 18.04.2024

Опубликована 25.06.2024

Mathematical modeling of trajectory motion control of a three-wheeled mobile robot

Evgeniy N. Politov ¹ ✉, Andrey V. Malchikov ¹, Ilya A. Zvonarev ¹

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: politovyevgeny@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. Improving the efficiency of the trajectory movement of three-wheeled robots by developing control system algorithms and selecting parameters based on mathematical modeling of robot movement along waypoints that characterize the required trajectory. Development of methods for planning the trajectories of a three-wheeled mobile robot based on the Pure Pursuit algorithm. Development of a mathematical model of the device that allows to obtain a numerical solution for the controlled movement of the robot along the waypoints. Analysis of the simulation results in order to establish the applicability of the proposed solutions for the tasks of controlling a two-section wheeled robot for landscape work.

Methods. The Pure Pursuit algorithm is used as a basis for the development of a control system for the trajectory movement of the robot, which allows forming the trajectories of the robot along waypoints with specified motion parameters. Methods of theoretical mechanics, robot mechanics, numerical integration, control theory, electrical engineering and electromechanics were used in the development of the mathematical model. When creating software products, Matlab/Simulink mathematical packages were used.

Results. As a result of the conducted research, the main regularities of the influence of the Lookahead Distance parameter of the Pure Pursuit trajectory algorithm on the nature of the controlled robot movement were discovered and confirmed. It is shown that the choice of the value of this parameter should be justified by the control tasks and working conditions of the robot. The developed mathematical model made it possible to obtain time diagrams for the parameters of the robot's movement, to establish the accuracy of the proposed algorithms.

Conclusion. It is established in the work that the Pure Pursuit algorithm proposed in the work can be used to implement trajectory control of wheeled mobile robots. The method does not require high performance of the computing system and provides satisfactory qualitative and quantitative characteristics of motion control.

Keywords: trajectory control; Pure Pursuit algorithm; three-wheeled robot; kinematic characteristics of movement; mathematical model.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The work was carried out within the framework of the implementation of the development program of the Southwest State University of the project "Priority-2030".

For citation: Politov E.N., Malchikov A.V., Zvonarev I.A. Mathematical modeling of trajectory motion control of a three-wheeled mobile robot. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(2): 20-36 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-20-36>.

Received 12.02.2024

Accepted 18.04.2024

Published 25.06.2024

Введение

В развитых и развивающихся странах мира, на фоне четвертого демографического перехода, всё острее наблюдается нехватка человеческих ресурсов. Постоянный дефицит кадров во всех сферах экономики вынуждает правительства и частный бизнес пытаться автоматизировать различные процессы: складские работы, транспортировка грузов, беспилотные технологии в такси. Данные виды деятельности, применимо к автономным роботам или транспортным платформам, сопряжены с постоянным взаимодействием с людьми (обнаружение, объезд, коллаборация), что делает невозможным применение существующих алгоритмов управления данными устройствами: столкновение с препятствиями для их обнаружения, стохастическое движение в рабочей зоне, отсутствие распознавания объектов и картирования окружающего пространства. Это приводит к необходимости разработки новых алгоритмов, устраняющих недостатки описанных выше систем и расширяющих их функционал.

Трехколесные мобильные роботы с двумя независимыми приводами широко используются в качестве транспортной платформы в самых различных областях: погрузчики, газонокосилки, пы-

лесосы, тягачи и др. [1-7]. В частности, в работах [2, 5, 7] предложены конструктивные схемы роботизированных тягачей для буксировки воздушных судов, в статье [4] рассматривается многоцелевая колесная платформа, работа [6] посвящена описанию системы управления движением автороботов.

Задачи математического моделирования кинематики мобильных колесных роботов ранее рассмотрены в работах [7, 8], моделирование динамики движения колесных роботов приведено в работах [9-12]. Так, в статье [8] приведена расчетная схема трехколесного робота-тягача и математическая модель его движения. В статье [9] описана математическая модель движения двухсекционного колесного робота, учитывающая неголономные связи, трение колес о поверхность, а также относительное движение секций. В работах [10-12] рассмотрены динамические модели мобильных роботов с дифференциальными приводами колес.

Особый интерес представляют задачи моделирования и реализации управляемого движения колесных роботов по заданным траекториям [8, 13-16].

Так, в работе [13] рассмотрен алгоритм управления движением мобильной роботизированной платформы.

Целью данной работы является повышение эффективности траекторного движения трехколесных роботов за счет разработки алгоритмов системы управления и подбора параметров на основании математического моделирования движения робота вдоль путевых точек, характеризующих требуемую траекторию движения.

Материалы и методы

Существует несколько методов управления движением колесных транспортных средств по заданной траектории [17].

В данной работе для реализации траекторного управления мобильным роботом предложен Pure Pursuit-метод, известный так же, как «чистое преследование» [17-20].

В работе системы управления трехколесным роботом ключевым является блок формирования угловых скоростей ведущих колес, необходимых для движения робота по заданным точкам на плоскости [10]. Имея систему локального позиционирования и информацию об угловой скорости колес, можно получить требуемые и текущие координаты робота, а также угол его ориентации относительно оси X глобальной системы координат. На рис. 1 представлена схема движения трехколесного мобильного робота по участку работы. На пути движения робота имеются статические препятствия.

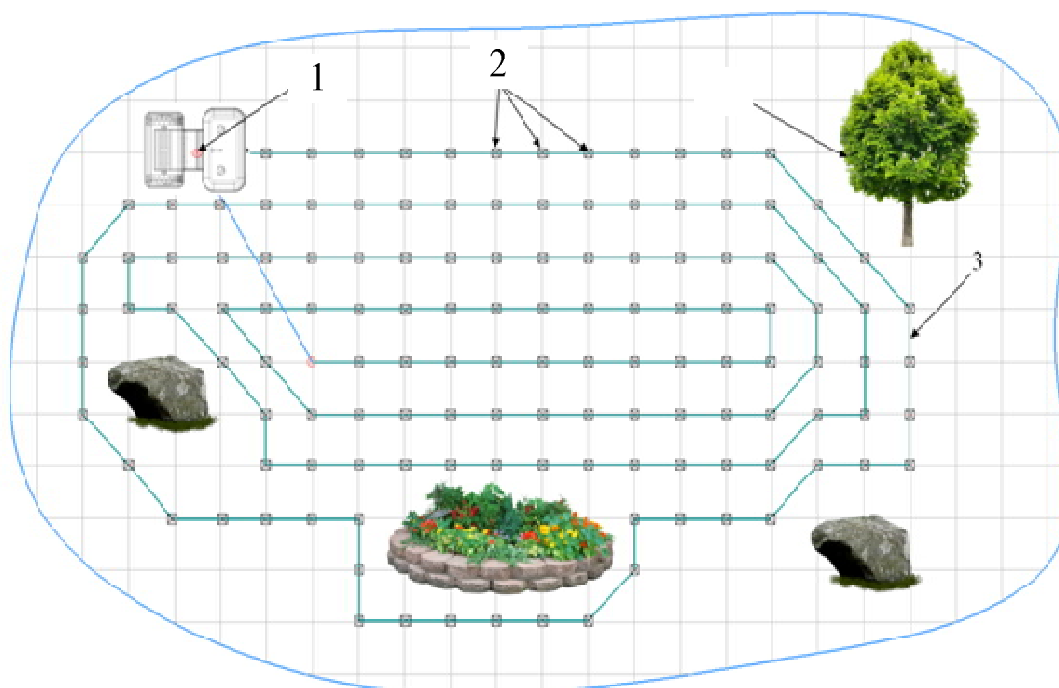


Рис. 1. Схема движения робота по участку: 1 – трехколесный робот; 2 – путевые точки; 3 – планируемая траектория движения робота; 4 – препятствия

Fig. 1. Scheme of the robot's movement along the section: 1 – a three-wheeled robot; 2 – waypoints; 3 – the planned trajectory of the robot; 4 – obstacles

В качестве одной из траекторий движения рассмотрим движение от периферии к центру по прямоугольной спирали. При появлении препятствий алгоритм системы управления позволяет роботу изменить траекторию своего движения, объехать препятствие, а затем вернуться на траекторию. Данная траектория изначально записывается в память устройства, а при выборе в начале работы дополнительно масштабируется под размеры участка на основании данных системы УЗ-маяков.

Алгоритм масштабирования: размеры участка определяются по данным измерений расстояния УЗ-маяков, после чего он виртуально разбивается на оп-

ределенное число квадратов, размеры которых зависят от задач работы.

После создания сетки на ней создается массив путевых точек, через которые строится планируемая траектория движения (строятся прямые между точками). На основе данной траектории алгоритм Pure Pursuit формирует требуемые для движения по ней значения угловых скоростей ведущих колес. В конце работы робот возвращается в точку начала движения. Для корректировки положения и возврата на траекторию используется система позиционирования.

На рис. 2 представлена кинематическая схема объекта управления. За его основу взята дифференциальная схема приводной системы [7, 10].

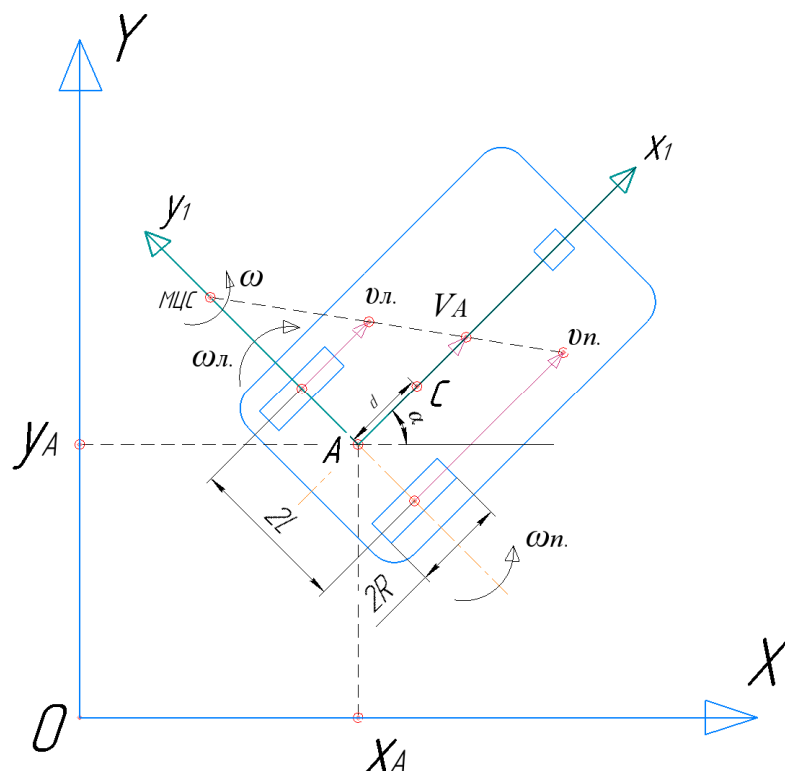


Рис. 2. Кинематическая схема трехколесной роботизированной платформы

Fig. 2. Kinematic diagram of a three-wheeled robotic platform

На схеме представлены следующие обозначения: C – центр масс робота; $\omega_{\text{л.}}$, $\omega_{\text{п.}}$ – угловые скорости левого и правого колес соответственно; $\vartheta_{\text{л.}}$, $\vartheta_{\text{п.}}$ – линейные скорости левого и правого колес соответственно; A – центр оси вращения колес, начало координат собственной системы координат x_1 и y_1 ; α – угол отклонения собственной оси x_1 от оси X инерциальной системы координат; V_A – вектор скорости точки A ; R – радиус колеса;

d – смещение центра масс робота от центра оси вращения колес.

В качестве основной стратегии управления рассматривается алгоритм траекторного движения Pure Pursuit [17-21].

Работа алгоритма основана на геометрических вычислениях требуемой траектории движения устройства к мгновенным целевым точкам по их имеющимся координатам. Схема определения параметров движения трехколесного робота представлена на рис. 3.

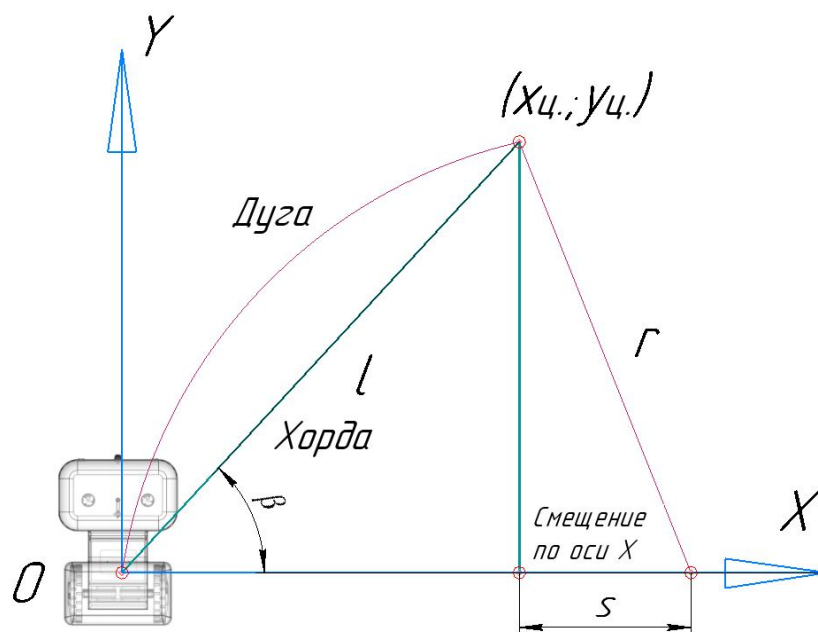


Рис. 3. Схема определения параметров движения робота к целевой точке

Fig. 3. The scheme of determining the parameters of the robot's movement to the target point

На данной схеме приняты обозначения: O – начальная точка движения; $x_{\text{ц.}}$, $y_{\text{ц.}}$ – координаты мгновенной целевой точки; r – радиус дуги; l – длина хорды дуги (равна величине Lookahead Distance); s – смещение радиуса по оси X . Если $x_{\text{ц.}} = y_{\text{ц.}}$, то $d = 0$ и $x_{\text{ц.}} = y_{\text{ц.}} = r$.

В общем случае геометрические величины рассчитываются по формулам:

$$l = \sqrt{x_{\text{ц.}}^2 + y_{\text{ц.}}^2}, \quad (1)$$

$$r = \frac{l^2}{2 \cdot x_{\text{ц.}}} = x_{\text{ц.}} + s, \quad (2)$$

$$s = r - x_{\text{ц.}}. \quad (3)$$

Кривизна дуги определяется по формуле

$$\gamma = \frac{1}{r} = \frac{2 \cdot x_{\text{ц.}}}{l^2}. \quad (4)$$

Геометрические операции можно свести к следующему набору действий:

- определение расстояния до мгновенной целевой точки (равняется хорде дуги);
- определение кривизны траектории, которая позволит роботу достичь мгновенной целевой точки;
- построение дуги необходимой кривизны, соединяющей текущую точку и мгновенную целевую.

После определения всех геометрических параметров алгоритм позволяет задать максимальную угловую скорость движения робота при поворотах ($\omega_{\max}$), а так же требуемую линейную скорость (которую алгоритм должен поддерживать на большей части траектории), определяемую по формуле

$$\vartheta_{\text{треб.}} = \sqrt{\vartheta_i^2 + 2al}, \quad (5)$$

где ϑ_i – скорость робота в предыдущей точке (равна нулю при начале движения); a – максимальное ускорение (определяется, исходя из требуемой скорости); l – расстояние до мгновенной целевой точки.

При расчете скорости на поворотах учитывается кривизна траектории, поэтому робот автоматически замедляется для избегания заносов и опрокидываний.

Линейную и угловую скорости робота можно получить из уравнений:

$$\omega_p = \frac{\vartheta_{\text{треб.}}}{r}; \quad \vartheta_p = \omega_p \cdot r. \quad (6)$$

Работа алгоритма Pure Pursuit состоит из следующих операций:

- определение текущих координат робота;

- нахождение ближайшей заданной путевой точки;

- нахождение ближайшей мгновенной целевой точки (определяется параметром Lookahead Distance);

- преобразование глобальных координат мгновенной целевой точки в локальные координаты робота;

- расчет кривизны и нахождение дуги требуемой траектории движения;

- вычисление необходимых линейной и угловой скоростей робота, решение обратной задачи кинематики и нахождение значений угловых скоростей ведущих колес, обеспечивающих необходимые скоростные параметры;

- достижение заданной точки;

- обновление текущих координат робота, повторение алгоритма.

Преимуществами данного алгоритма траекторного движения являются простота его реализации, точность работы и устойчивость к внешним возмущениям (внезапные препятствия на пути, неровности местности и т.д.).

К ключевому недостатку данного метода можно отнести отсутствие учета в алгоритме конструкционных и динамических параметров робота и его приводов, что может приводить к получению неадекватных значений ускорений в элементах робота при моделировании из-за необходимости мгновенного изменения линейных и угловых скоростей корпуса или колес. При практической реализации алгоритма данный недостаток практически полностью устраняется за счет инерционных процессов, проис-

ходящих в электроприводах трехколесного робота [10, 17, 20].

При рассмотрении систем позиционирования, являющихся ключевым элементом любого траекторного управления, для автономных мобильных наземных роботов наиболее проработанными и часто используемыми являются следующие способы навигации:

– GPS;

– Система маяков (метод трилатерации или триангуляции);

– SLAM-метод (метод одновременной локализации и построения (или обновления) карты местности;

– Колесно-инерционная одометрия;

– Визуальная одометрия.

Сравнительная характеристика приведенных способов навигации представлена в табл. 1.

Табл. 1. Сводная таблица характеристик способов навигации автономных мобильных роботов

Table 1. Summary table of characteristics of navigation methods for autonomous mobile robots

	GPS / GPS	Маяки / Light- houses	SLAM / SLAM	Колесно- инерционная одометрия / Wheel inertia odometry	Виртуальная одометрия / Virtual odometry
Не накапливает ошибку	+	+	+	–	–
Высокая точность на коротких траекториях	–	+/-	+/-	+	+
Работа в заранее неопределенной среде	+	+/-	+	+	+
Снижение точности при работе в помещениях	+	+	–	–	–
Ограничение размера территории работы	–	+	+/-	–	–
Невосприимчивость к проскальзыванию колес	+	+	+	–	+
Необходимость наличия стационарных объектов	–	+	+/-	–	–
Невосприимчивость к изменениям в среде	+	+	+	+/-	+

Анализируя каждый из приведенных способов, можно выделить два основных, наиболее подходящих для задач, стоящих перед трехколесным роботом – SLAM и позиционирование по системе маяков.

Однако SLAM-метод требует использования достаточно сложных программных алгоритмов и дорогостоящего оборудования – лидара, стоимость которогократно растёт с увеличением даль-

ности работы его излучателей. Также, SLAM-метод требует наличия в рабочей зоне тех или иных опорных ориентиров (например, забора), которые из-за низкого расположения лидара на корпусе робота могут быть пропущены или необработанны.

При сравнении методов Pure Pursuit и SLAM (с учетом факторов сложности и дороговизны их аппаратной и программной реализации), можно прийти к выводу, что при разработке системы управления трехколесным роботом, работающем на участке с преимущественно статическими препятствиями, оптимальным будет использование рассмотренного в работе метода «чистое преследование».

Результаты и их обсуждение

С целью моделирования алгоритма управления движением мобильного колесного робота по заданной траектории была разработана блок-схема в пакете MATLAB\Simulink\Simscape Multibody (рис. 5), в которой используются четыре основные подсистемы: «Робот» (моделирует динамику движения трехколесного робота); «Электропривод 1,2» (моделируют динамику коллекторных ДПТ); «Траектория» (данная подсистема моделирует работу алгоритма Pure Pursuit, а также решает прямую и обратную задачи кинематики) [19].

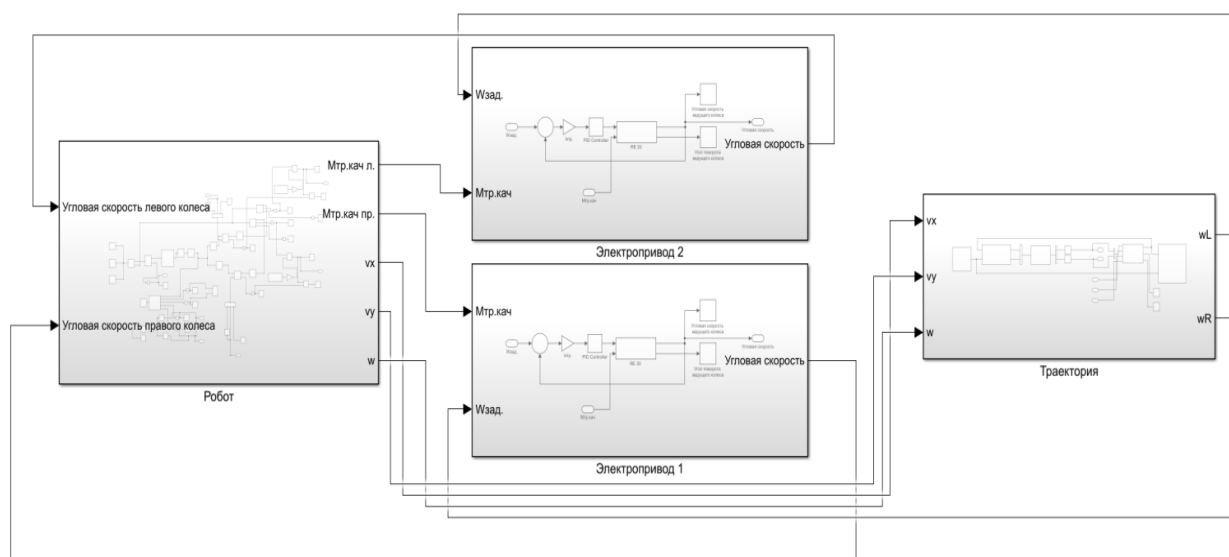


Рис. 5. Блок-схема математической модели трехколесного робота с системой траекторного управления

Fig. 5. Block diagram of a mathematical model of a three-wheeled robot with a trajectory control system

Для проверки работы программы управления был задан массив путевых точек $[0,0;2,2;3,4;1,3]$ (м). Целевая линейная скорость – 0,3 (м/с).

Для исследования влияния параметра Lookahead Distance на характер движения робота была проведена серия численных экспериментов. Исследована

работа алгоритма Pure Pursuit при 3-х значениях данного параметра: 0,35 м (эксперимент I), 1 м (эксперимент II), 0,1 м (эксперимент III). При исследова-

нии использован один и тот же массив путевых точек.

Результаты моделирования представлены на рис. 6-9.

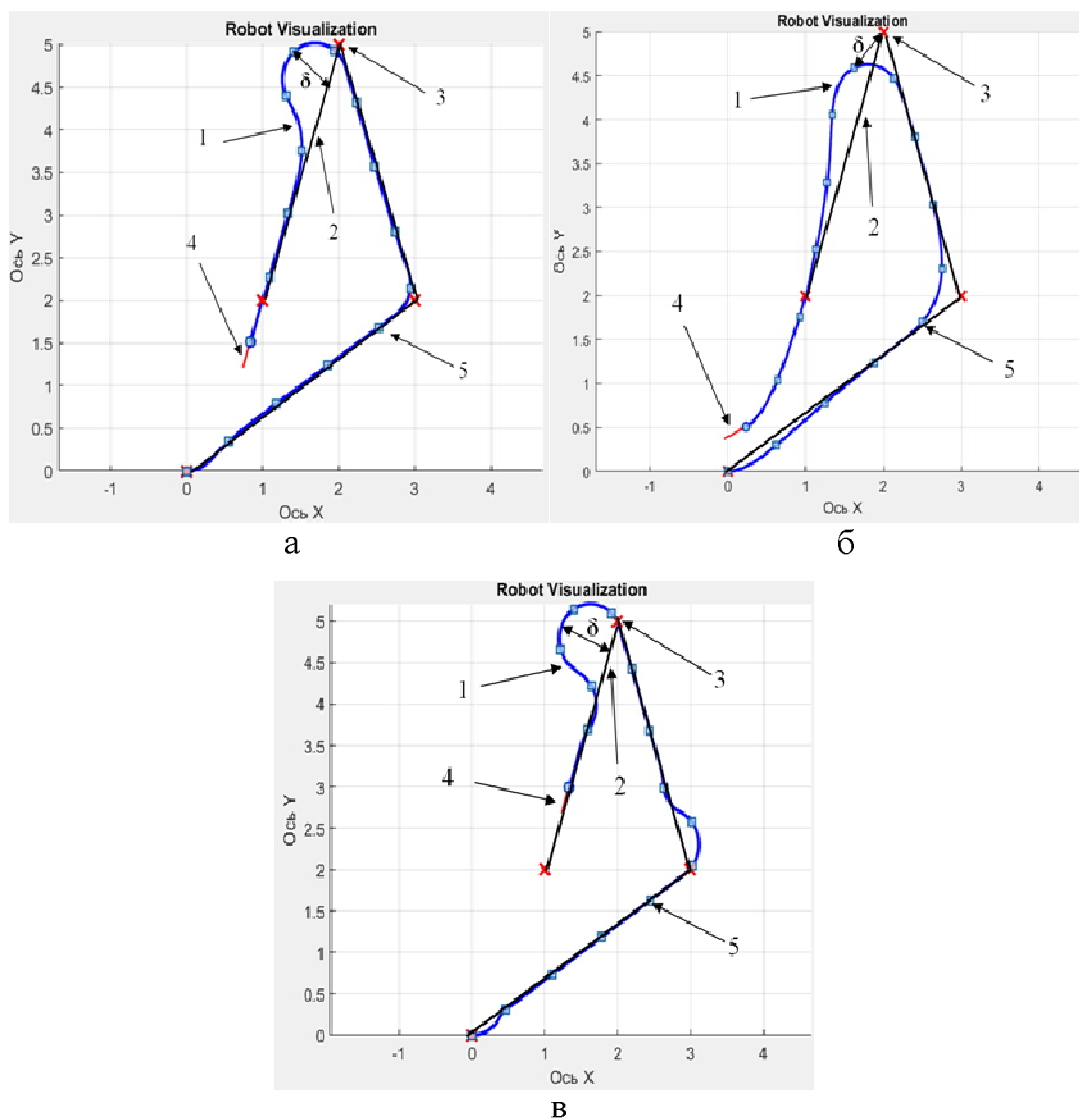


Рис. 6. Траектория движения робота по заданным путевым точкам:

а – Lookahead Distance = 0.35 м; **б** – Lookahead Distance = 1 м; **в** – Lookahead Distance = 0.1 м

Fig. 6. Diagram of the robot's movement along the specified waypoints:

а – Lookahead Distance = 0.35 м; **б** – Lookahead Distance = 1 м; **в** – Lookahead Distance = 0.1 м

На данном рисунке позициями обозначены: 1 – реальная траектория движения робота; 2 – планируемая траектория движения робота; 3 – путевая точка; 4 – вектор Lookahead Distance; 5 – мгновен-

ные целевые точки; δ – макс. отклонение реальной траектории от планируемой.

Качественные и количественные результаты моделирования представлены в табл. 2.

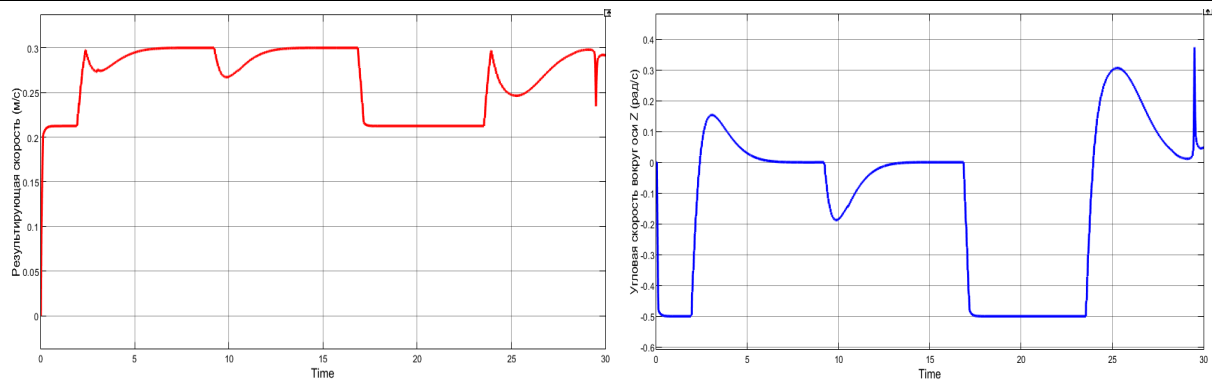


Рис. 7. Временные диаграммы линейной и угловой скоростей робота для I эксперимента

Fig. 7. Time diagrams of linear and angular velocities of the robot I experiment

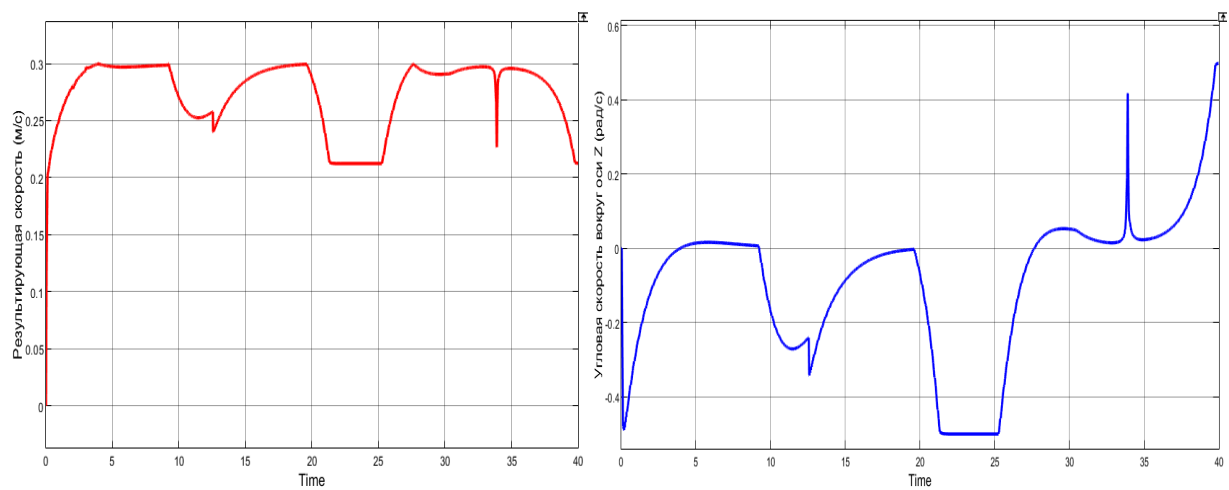


Рис. 8. Графики линейной и угловой скоростей робота в опыте II эксперимента

Fig. 8. Graphs of linear and angular velocities of the robot in the experiment II experiment

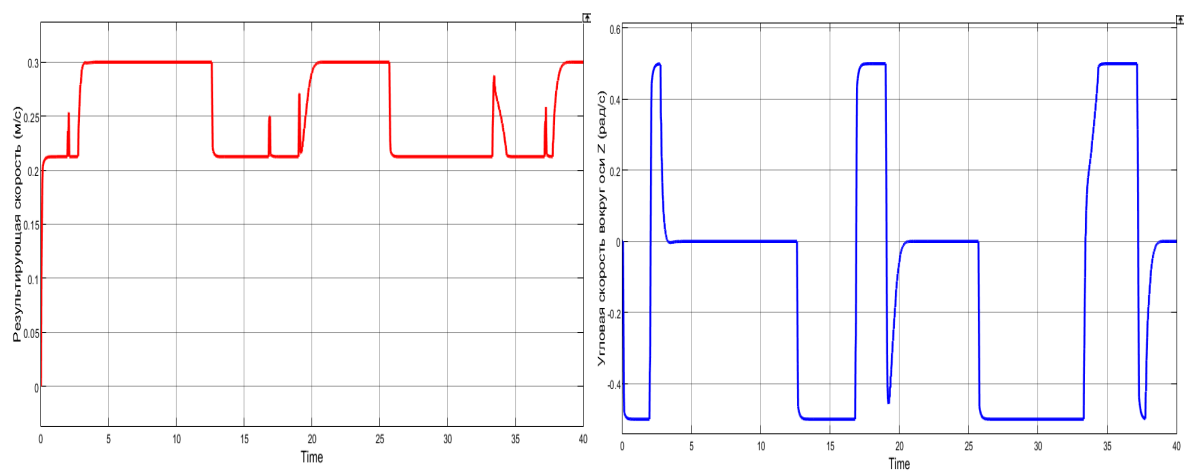


Рис. 9. Графики линейной и угловой скоростей робота в III эксперименте

Fig. 9. Graphs of linear and angular velocities work in the III experiment

Таблица 2. Основные результаты моделирования и исследования

Table 2. Main results of modeling and research

№ эксперимента / Experiment No.	Lookahead Distance, м	Время прохождения траектории, с / Trajectory travel time, s	Средняя скорость движения, м/с / Average speed of movement, m/s	Максимальное отклонение от планируемой траектории δ , м / Maximum deviation from the planned trajectory, δ , m
I	0,35	35	0,27	0,4
II	1	34	0,28	0,3
III	0,1	более 40	0,23	0,6

Согласно результатам моделирования, результаты можно охарактеризовать следующим образом: в I эксперименте – пересечение всех путевых точек, лишь 1 «избыточный» поворот и изгиб траектории; в II эксперименте – самая плавная траектория, робот не достигает путевых точек, из-за чего траектория искажается; в III эксперименте – путевые точки достигаются, но имеются «избыточные» повороты и изгибы траектории; скорость робота сильно падает.

Анализируя графики кинематических характеристик, можно сделать вы-

вод, что из всех трех коэффициентов Lookahead Distance наиболее оптимальной по соотношению точность движения/скорость движения/время движения является величина 0.35м.

Также была создана математическая модель работы УЗ-дальномера, с помощью которого определяются расстояние до препятствия и угол отклонения положения препятствия от вектора Lookahead Distance (который сонаправлен с осью X системы координат робота). Результаты работы данной подсистемы представлены на рис. 10 и 11.

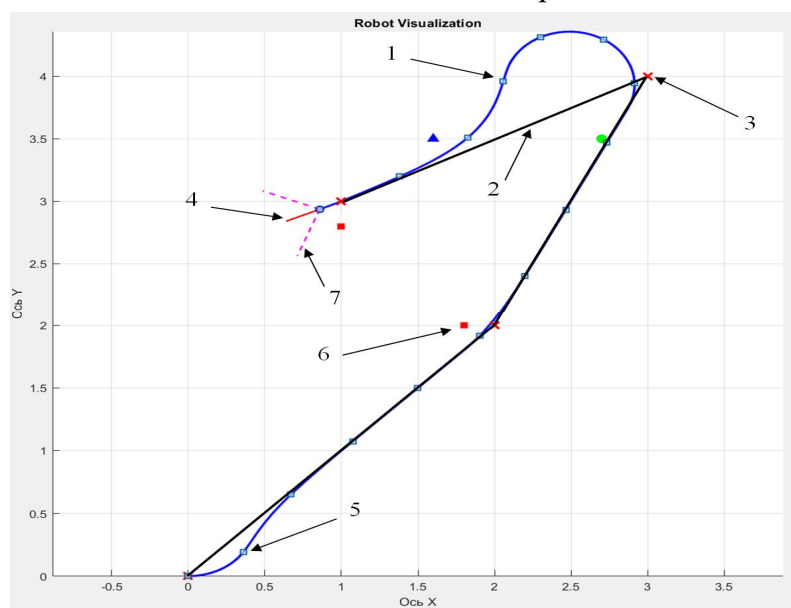


Рис. 10. Траектория движения робота по заданным путевым точкам (с учетом наличия препятствий)

Fig. 10. The trajectory of the robot along the specified waypoints (taking into account the presence of obstacles)

На рис. 10: 1 – реальная траектория движения робота, 2 – планируемая траектория движения робота, 3 – путевая точка, 4 – вектор Lookahead Distance,

5 – мгновенные целевые точки, 6 – различные препятствия, 7 – угол обзора УЗ-дальномера

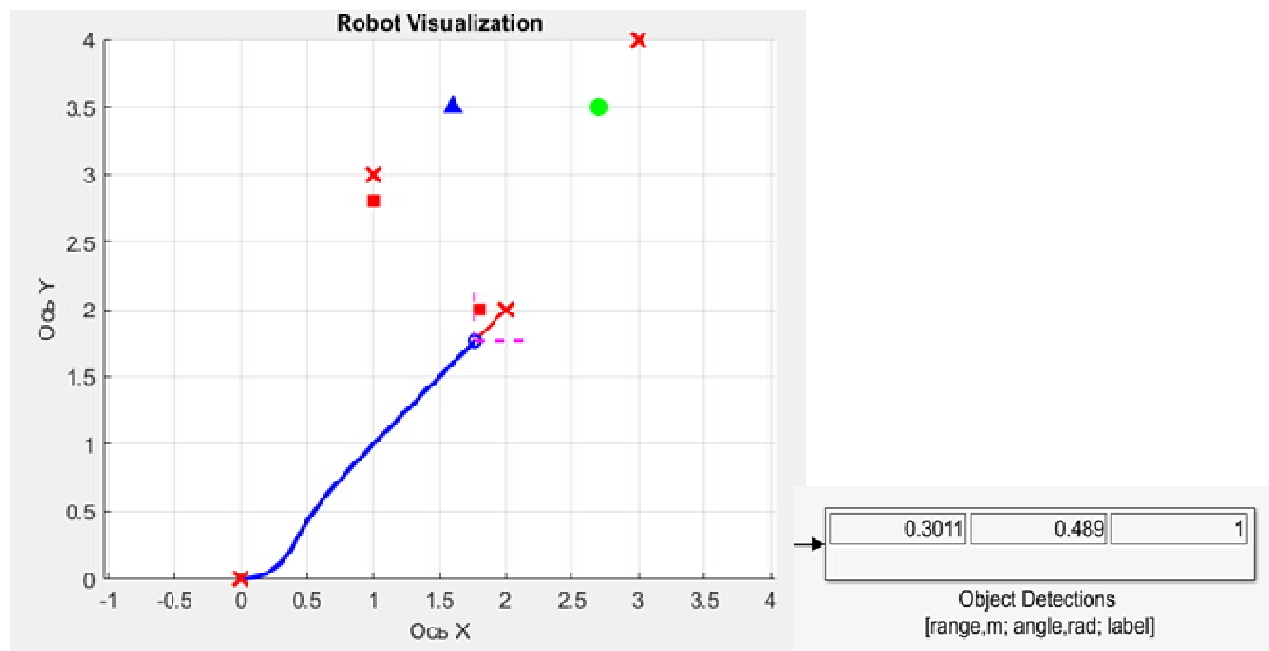


Рис. 11. Определение расстояния и угла отклонения до препятствия

Fig. 11. Determination of the distance and angle of deviation to the obstacle

Выводы

Предложенный в работе Pure Pursuit метод может быть использован для осуществления траекторного управления колесных мобильных роботов. Метод прост в реализации, не требует сложных математических расчетов и обеспечивает удовлетворительные качественные и количественные характеристики управления движением.

В результате проведенного исследования были обнаружены и подтверждены основные закономерности влияния параметра Lookahead Distance алгоритма траекторного движения Pure Pursuit на характер движения управляемого робота. Показано, что выбор величины данного параметра должен обосновываться задачами управления и условиями работы робота.

Список литературы

1. Ворочаева Л.Ю., Мальчиков А.В., Савин С.И. Определение диапазонов допустимых значений геометрических параметров колесного прыгающего робота // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 2(77). С. 76-84. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-2-76-84>.

2. Извеков А. И., Остренко А. Г., Ветрогон А. А. Транспортно-технологический модуль для перемещения крупногабаритных грузов // Вестник молодежной науки. 2020. №. 2 (24). С. 10.
3. Ворочаева Л. Ю., Мальчиков А. В., Савин С. И. Обоснование и выбор схемы колесной прыгающей мониторинговой платформы // Транспортное машиностроение. 2018. №. 5 (66). С. 40-50.
4. Набиюллин А. Р., Кавалеров М. В. Многоцелевая колесная роботизированная платформа с низкой себестоимостью // Extreme Robotics. 2013. Т. 1. №. 1. С. 70-79.
5. Афонин Д.В., Печурин А.С., Яцун С.Ф. Моделирование автономного криволинейного движения роботизированной буксировочной системы воздушных судов // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2022. № 2. С. 91-102
6. Кабала А.Э.А., Гайдук А.Р., Абу Хамдан Н. Управление поворотами мобильного робота, подобного автомобилю // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т.25, №4. С. 134-144. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-134-144>.
7. Моделирование движения робота-тягача для транспортировки самолетов по аэродрому / С.Ф. Яцун, В.В. Бартенев, Е.Н. Политов, Д.В. Афонин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 2(77). С. 34-43. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-2-34-43>.
8. Мартыненко Ю.Г., Управление движением мобильных колёсных роботов // Фундамент. и прикл. матем. 2005. Т. 11, № 8. С. 29–80; J. Math. Sci. 2007. 147:2. P. 6569–6606.
9. Politov E., Afonin D., Bartenev V. Mathematical Modeling of Motion of a Two-Section Wheeled Robot // Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings”. Springer, Singapore, 2020. P. 397-409.
10. Morin P., Samson C. Motion control of wheeled mobile robots //Springer handbook of robotics. 2008. Vol. 1. P. 799-826.
11. Dhaouadi R., Hatab A.A. Dynamic modelling of differential-drive mobile robots using lagrange and newton-euler methodologies: A unified framework // Advances in Robotics & Automation. 2013. Vol. 2, no. 2. P. 1.
12. Локтионова О.Г., Савельева Е.В., Политов Е.Н. Алгоритм управления движением мобильной роботизированной платформы с изменяемым уровнем автономности // International Journal of Open Information Technologies. 2023. №4.
13. Martins F.N., Sarcinelli-Filho M., Carelli R. A velocity-based dynamic model and its properties for differential drive mobile robots // Journal of intelligent & robotic systems. 2017. Vol. 85, no. 2. P. 277.
14. Leena N., Saju K.K. Modelling and trajectory tracking of wheeled mobile robots // Procedia technology. 2016. Т. 24. P. 538.

15. Lee K. et al. Design of fuzzy-PID controller for path tracking of mobile robot with differential drive // International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems. 2018. Vol. 18, no. 3. P. 220.
16. Wang B., Qian C., Chen Q. A Dynamics Controller Design Method for Car-like Mobile Robot Formation Control // MATEC Web of Conferences (EECR 2018). Vol. 160, Article No. 06003.
17. Ding Y. Three Methods of Vehicle Lateral Control: Pure Pursuit, Stanley and MPC. 2020.
18. Wang R. et al. A novel pure pursuit algorithm for autonomous vehicles based on salp swarm algorithm and velocity controller // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 166525-166540.
19. Pure Pursuit Controller // Mathworks.com: сайт. URL: <https://www.mathworks.com/help/robotics/ug/pure-pursuit-controller.html> (дата обращения: 18.05.2022).
20. Ahn J. et al. Accurate path tracking by adjusting look-ahead point in pure pursuit method // International journal of automotive technology. 2021. Vol. 22, no. 1. P. 119-129.

References

1. Vorochaeva L.Yu., Malchikov A.V., Savin S.I. Ranges of Admissible Values of Geometric Parameters of a Wheeled Jumping Robot. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2018; 22 (2): 76-84 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-2-76-84>.
2. Izvekov A. I., Ostrenko A. G., Vetrogon A. A. Transport and technological module for moving bulky cargo. *Vestnik molodezhnoi nauki = Bulletin of Youth Science*. 2020; (2): 10 p. (In Russ.)
3. Vorochaeva L. Yu., Malchikov A.V., Savin S. I. Justification and selection of the scheme of a wheeled jumping monitoring platform. *Transportnoe mashinostroenie = Transport engineering*. 2018; (5): 40-50. (In Russ.)
4. Nabiullin A. R., Kavalerov M. V. Multipurpose wheeled robotic platform with low cost. *Extreme Robotics*, 2013; 1 (1): 70-79. (In Russ.)
5. Afonin D.V., Pechurin A.S., Yatsun S.F. Modeling of autonomous curvilinear motion of a robotic towing system of aircraft. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin = Problems of mechanical engineering and machine reliability*. 2022; (2): 91-102. (In Russ.)
6. Kabalan A.E.A., Gaiduk A.R., Hamdan N.A. Controlling the Turning of a Mobile Car-like Robot. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 134-144 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-134-144>.
7. Jatsun S.F., Bartenev V.V., Politov E.N., Afonin D.V. Modeling the Motion of the Robot-Tractor for Transporting Aircraft on the Airfield. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2018; 22 (2): 34-43 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-2-34-43>.

8. Martynenko Yu.G. Motion control of mobile wheeled robots. *Fundament. i prikl. matem. = Foundation. and approx. matem.*, 2005; 11:8, 29-80. (In Russ.); *J. Math. Sci.* 2007; 147:2, 6569–6606. (In Russ.)
9. Politov E., Afonin D., Bartenev V. Mathematical Modeling of Motion of a Two-Section Wheeled Robot. *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. Springer, Singapore, 2020, p. 397-409.
10. Morin P., Samson C. Motion control of wheeled mobile robots. *Springer handbook of robotics*. 2008; 1: 799-826.
11. Dhaouadi R., Hatab A.A. Dynamic modelling of differential-drive mobile robots using lagrange and newton-euler methodologies: A unified framework. *Advances in Robotics & Automation*. 2013; 2(2): 1.
12. Loktionova O.G., Savelyeva E.V., Politov E.N. Algorithm for motion control of a mobile robotic platform with a variable level of autonomy. *International Journal of Open Information Technologies*. 2023; (4). (In Russ.)
13. Martins F.N., Sarcinelli-Filho M., Carelli R. A velocity-based dynamic model and its properties for differential drive mobile robots. *Journal of intelligent & robotic systems*. 2017; 85 (2): 277.
14. Leena N., Saju K.K. Modelling and trajectory tracking of wheeled mobile robots. *Procedia technology*. 2016; 24: 538.
15. Lee K. et al. Design of fuzzy-PID controller for path tracking of mobile robot with differential drive. *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*. 2018; 18 (3): 220.
16. Wang B., Qian C., Chen Q. A Dynamics Controller Design Method for Car-like Mobile Robot Formation Control. *MATEC Web of Conferences* (EECR 2018); vol. 160, Article No. 06003.
17. Ding Y. Three Methods of Vehicle Lateral Control: Pure Pursuit, Stanley and MPC, 2020.
18. Wang R. et al. A novel pure pursuit algorithm for autonomous vehicles based on salp swarm algorithm and velocity controller. *IEEE Access*. 2020; 8: 166525-166540.
19. Pure Pursuit Controller. *Mathworks.com*. Available at:: <https://www.mathworks.com/help/robotics/ug/pure-pursuit-controller.html>
20. Ahn J. et al. Accurate path tracking by adjusting look-ahead point in pure pursuit method. *International journal of automotive technology*. 2021; 22 (1): 119-129.

Информация об авторах / Information about the Authors

Политов Евгений Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: politovyevgeny@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0597-8505>

Мальчиков Андрей Васильевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zveroknp@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2902-1721>, ResearcherID N-8856-2016

Звонарев Илья Александрович, кафедра механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zveroknp@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-7306-098X>

Evgeniy N. Politov, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: politovyevgeny@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0597-8505>

Andrey V. Mal'chikov, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zveroknp@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2902-1721>, ResearcherID N-8856-2016

Илья А. Zvonarev, Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zveroknp@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-7306-098X>

Методика определения требуемого соотношения мембранных напряжений в тентовой оболочке арочного типа

А.В. Чесноков ¹✉, В.В. Михайлов ¹

¹ Липецкий государственный технический университет
ул. Московская, д. 30, г. Липецк 398055, Российская Федерация

✉ e-mail: andreychess742@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данной работы является разработка методики определения соотношения мембранных напряжений в тентовой оболочке, состоящей из множества секторов арочного типа, обеспечивающего требуемую высоту в центре сектора.

Методы. Для поиска требуемого соотношения мембранных напряжений применен итерационный метод хорд. Для определения высоты в центре сектора на каждой итерации производится поиск формы поверхности оболочки методом плотности сил, который заключается в определении координат узлов сети, наложенной на оболочку, путем решения системы уравнений равновесия, линеаризованной за счет введения подстановки, являющейся отношением усилий в элементах сети к их длинам.

Результаты. Разработан итерационный алгоритм поиска соотношения мембранных напряжений, состоящий из двух этапов: определение начального диапазона поиска и минимизация расхождения требуемой и полученной по расчету высоты оболочки в центре сектора. Эффективность алгоритма подтверждена численным моделированием ряда секторов тентового покрытия арочного типа на прямоугольном плане. Расхождение заданных высот в центре секторов и высот, полученных в специализированном лицензионном программном комплексе, не превышает 1,0 %.

Заключение. Форма поверхности тентовых оболочек зависит от мембранных напряжений. Задача поиска формы, в настоящее время, имеет достаточную степень теоретической проработки. Вместе с тем, обратная задача, позволяющая по заданным геометрическим параметрам оболочки найти искомое соотношение напряжений, не находит должного отражения в литературных источниках. Разработанная в настоящей работе методика будет способствовать упрощению процесса исследования и проектирования тентовых строительных конструкций. Дальнейшее развитие предложенной методики найдется в области расчета многосекционных тентовых систем с учетом податливости опорных конструкций, разделяющих смежные секции.

Ключевые слова: тентовая оболочка; конструкция строительная тентовая; форма поверхности; мембранное напряжение; метод хорд; метод плотности сил.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Чесноков А.В., Михайлов В.В. Методика определения требуемого соотношения мембранных напряжений в тентовой оболочке арочного типа. 2024. Т. 28, №2. С. 37-55. [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2024-28-2-37-55](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-37-55).

Поступила в редакцию 28.02.2024

Подписана в печать 05.04.2024

Опубликована 25.06.2024

Technique for obtaining the membrane stress ratio in a fabric arch-type shell

Andrei V. Chesnokov ¹ ✉, Vitalii V. Mikhailov ¹

¹ Lipetsk State Technical University,
30, Moskovskaya str., Lipetsk 398055, Russian Federation

✉ e-mail: andreychess742@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of this work is to develop the technique for obtaining the membrane stress ratio in a fabric shell which consists of a number of arch-type sectors of given height at the center.

Methods. The iterative secant method is used for finding the membrane stress ratio. The height in the center of a sector is determined by means of the force density method at every iteration. The method includes applying a mesh on a shell surface and determining the nodal coordinates of the mesh via the solution of the set of equilibrium equations. The equations of the set are linearized by means of substitutions, which are the force to length ratios for the mesh elements.

Results. The iterative technique for obtaining the membrane stress ratio has been developed. The technique consists of the following stages: initial search range determination and discrepancy minimization between the required and calculated heights at the center of the shell sector. The quality of the algorithm is confirmed by numerical simulating of a number of sectors of an arch-type fabric roof on a rectangular plan. The discrepancy between the specified heights in the center of the sectors and the heights obtained by the specialized licensed software package does not exceed 1.0%.

Conclusion. The surface shape of fabric shells depends on the membrane stresses. The shape-finding problem is well elaborated theoretically by now. Judging by the literature survey, however, the inverse problem of finding the membrane stress ratio given the geometrical parameters of the shell has not been developed yet. The proposed technique will facilitate research and development of fabric building constructions. Further development of the technique is in the field of multi-section fabric structural analysis with supporting structure compliance considered.

Keywords: fabric shell; fabric building structure; surface shape; membrane stress; secant method; force density method.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Chesnokov A. V., Mikhailov V. V. Technique for obtaining the membrane stress ratio in a fabric arch-type shell. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(2): 37-55 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-37-55>.

Received 28.02.2024

Accepted 05.04.2024

Published 25.06.2024

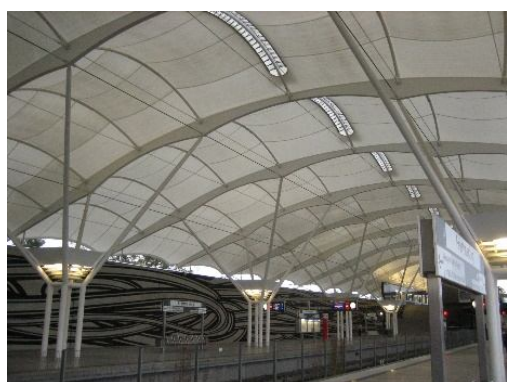
Введение

Конструкции строительные тентовые, состоящие из мягкой оболочки и поддерживающих элементов, находят применение для покрытия стадионов и дворцов спорта, выставочных и торговых павильонов [1], объектов транспортной инфраструктуры и площадок складирования материальных ресурсов [2], а также, в сооружениях сезонной эксплуатации [3-6] (рис. 1). Получили, также, развитие крупногабаритные технические устройства, включающие параболические антенные установки, основным конструктивным элементом которых являются механически напрягаемые мягкие оболочки [7, 8].

Оболочки тентовых конструкций относятся к большой группе полимерных композитов. Обзор конструкций покрытия зданий из композитных материалов

приводится в [9]. Тентовые оболочки химически инертны к большинству реагентов, содержащихся в окружающей газо-воздушной среде, что открывает широкие перспективы для применения в промышленных зданиях.

В отличие от железобетонных и металлических конструкций, мягкие оболочки не требуют применения тяжелого грузоподъемного оборудования для выполнения монтажных работ. Их транспортировка осуществляется в компактных свертках, имеющих малые габаритные размеры по сравнению с тентовой конструкцией в проектом положении. Оболочка, выполняя роль гибких связей по покрытию, оказывает существенное положительное влияние на повышение несущей способности опорных конструкций, предотвращая потерю устойчивости [10].



а)



б)

Рис. 1. Конструкции строительные тентовые: **а** – железнодорожная станция (Мюнхен); **б** – танцплощадка (Москва)

Fig. 1. Fabric building constructions: **a** – railway station (Munich); **b** – dance floor (Moscow)

Мягкая оболочка, способная работать только на растяжение, должна быть предварительно напряжена для сохранения работоспособного состояния под влиянием внешних нагрузок. При этом, форма ее поверхности зависит от мембранных напряжений [11].

Вопросы обеспечения требуемого натяжения оболочек, а также, особенности их проектирования и монтажа рассмотрены в работе [12]. Обзор теоретических положений и результатов экспериментальных исследований тентовых конструкций приведен в работе [13].

Для анализа мягких оболочек на действие внешних нагрузок и воздействий находят применение численные методы, среди которых можно выделить метод динамической релаксации и метод конечных элементов. Метод динамической релаксации, в котором узловые неуровновешенности рассматриваются как внешние нагрузки, действующие на заданные массы, эффективен для расчета пневматических и трансформируемых конструкций, а также, для выявления складок на поверхности мягкой оболочки [14].

Метод конечных элементов, заключающийся в дискретизации криволинейной оболочки на множество плоских фрагментов, находящихся в условиях статического равновесия, принадлежит числу наиболее универсальных методов численного анализа строительных конструкций [15-17]. Вместе с тем, на этапе поиска исходной формы мягкой оболочки, которую она обретает на стадии создания

предварительного напряжения, применение метода конечных элементов затруднено из-за сложности разбивки сети.

Теоретические основы определения равновесной формы поверхности мягких оболочек рассмотрены в работе [18]. В работах [19, 20] поиск формы оболочки осуществляется путем решения дифференциального уравнения равновесия поверхности при помощи искусственной нейронной сети, что позволяет получить точные результаты, удовлетворяющие всем граничным условиям. В работе [21] предлагается методика поиска формы мягкой оболочки с учетом нелинейной работы под действием внешней нагрузки, вызывающей избыточные деформации.

Метод плотности сил, который заключается в определении координат узлов сети, наложенной на поверхность, путем решения линеаризованной системы алгебраических уравнений равновесия, находит наиболее широкое распространение для поиска формы гибких поверхностей, образованных мягкими оболочками [18]. Развитие метода плотности сил, включающее учет дополнительных условий, таких как обеспечение равномерности мембранных напряжений в оболочке и т.н. «размеростабильности», поддерживающей оболочку вантовой сети, предложено в работах [7, 22]. Совершенствование метода плотности сил, позволяющее уменьшить объемы вычислений, повысив, при этом точность результата, предложено в работе [23].

Применение специализированного программного комплекса EASY¹, реализующего метод плотности сил, предложено в работе [24] для анализа тентового покрытия совместно с поддерживающими элементами несущего каркаса в виде прямолинейных балок и ферм. Вместе с тем, в работе [25] подчеркивается, что комбинация мягких оболочек с опорными конструкциями, не предназначенными для обеспечения необходимой кривизны оболочки, приводит к появлению складок на поверхности за счет образования недонапряженных зон. Таким образом, применение арочных конструкций, позволяющих получить криволинейную форму оболочки, является более предпочтительным с точки зрения выработки рациональных проектных решений.

Из приведенного литературного обзора следует вывод о том, что проблема поиска формы поверхности мягкой оболочки имеет достаточную степень теоретической и практической проработки. Вместе с тем, решение обратной задачи, заключающейся в определении величины мембранных напряжений, обеспечивающих заданную форму оболочки, не находит должного отражения в литературных источниках. Это осложняет процесс проектирования тентовых конструкций, не позволяя напрямую задать требуемые геометрические параметры оболочки.

¹ EASY. Software for form finding, statics and patterning: сайт. URL: <https://www.technet-gmbh.com/en/products/easy/> (дата обращения: 22.02.2024)

Целью работы является разработка методики определения соотношения мембранных напряжений в секторе тентовой оболочки арочного типа, обеспечивающего заданную высоту в центре сектора.

Материалы и методы

В исследуемом покрытии мягкая оболочка представляет собой совокупность секторов, ограниченных с двух сторон арками, расположенными в продольном направлении. В направлении ската покрытия находятся шарнирные балки (рис. 2). Мягкая оболочка, удерживаемая арками в проектном положении, имеет отрицательную Гауссову кривизну, что способствует восприятию знакопеременных внешних воздействий. Для сектора тентового покрытия арочного типа на прямоугольном плане выделены следующие геометрические параметры (рис. 3): пролет L_a , стрела f_a , и шаг B_a опорных арок, несущих мягкую оболочку, а также, высота f_f , представляющая собой расстояние от плоскости, проходящей через опоры несущих арок (базовой плоскости), до центра сектора покрытия.

Высота f_f совпадает со стрелой стабилизирующих нитей (т.н. нити «утка») на оси симметрии оболочки. Предлагается, также, ввести дополнительный параметр, f_w , являющийся стрелой несущих нитей (нити «основы»). Несущие нити лежат вдоль направления разворачивания рулона тентового материала, из которого изготовлена оболочка, в то время как стабилизирующие нити перпендикулярны

основе. Мягкая оболочка проявляет анизотропные свойства: прочностные и жесткостные свойства в направлении «основы» превышают соответствующие показатели оболочки в направлении «утка».

Стрелы арок и нитей оболочки связаны зависимостью:

$$f_f = f_a - f_w. \quad (1)$$

Размеры в плане секторов арочного тентового покрытия предлагается ограничить диапазонами: $L_a \in [6,0 \dots 12,0]$ м и $B_a \in [2,0 \dots 12,0]$ м. Относительная стрела арки, k_a , принята в диапазоне $[0,15 \dots 0,40]$, где

$$k_a = f_a / L_a. \quad (2)$$

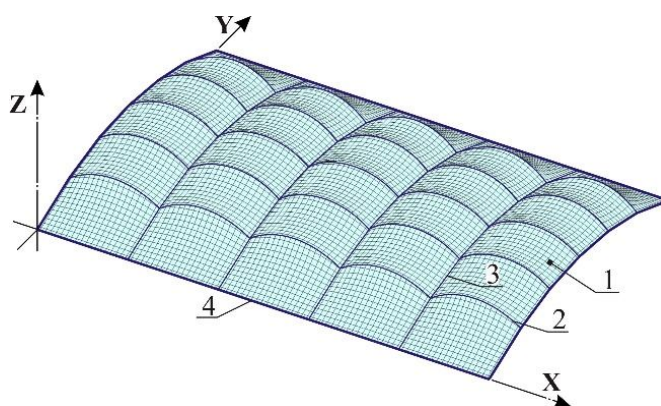


Рис. 2. Тентовая конструкция покрытия арочного типа: 1 – сектор мягкой оболочки; 2 – арка; 3 – промежуточная балка поперечного направления; 4 – обвязочная балка по периметру

Fig. 2. Fabric arch-type roof structure: 1 – sector of the soft shell; 2 – arch; 3 – intermediate transverse beam; 4 – outer beam at the perimeter

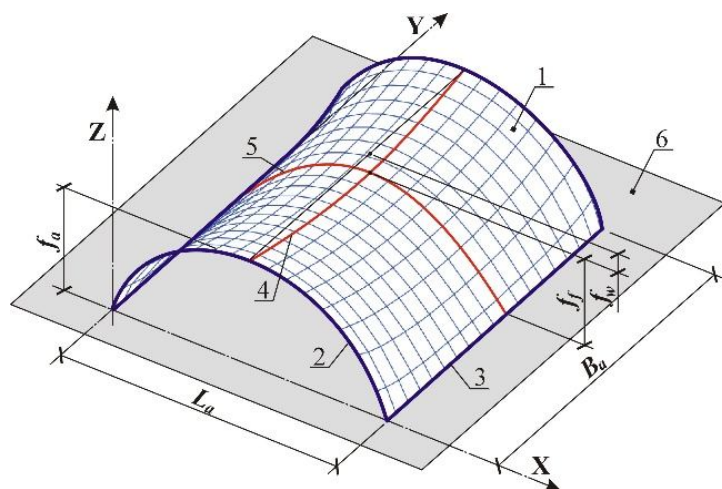


Рис. 3. Сектор тентового покрытия арочного типа: 1 – мягкая оболочка; 2 – арка; 3 – балка поперечного направления; 4, 5 – направления «основы» и «утка» мягкой оболочки, соответственно; 6 – базовая плоскость

Fig. 3. Arch-type fabric roof sector: 1 – soft shell; 2 – arch; 3 – transverse beam; 4, 5 – “warp” and “weft” threads of the soft shell, respectively; 6 - base plane

Относительную высоту сектора оболочки, k_f , ограничим снизу:

$$k_f \geq 1/25, \quad (3)$$

$$\text{где } k_f = f_f / L_a. \quad (4)$$

Относительная стрела нитей основы, k_w , принята в диапазоне $[1/16...1/8]$, где

$$k_w = f_w / B_a. \quad (5)$$

Для определения формы поверхности мягкой оболочки применен Метод плотности сил. С оболочкой связана т.н. «поверхностная сеть», состоящая из шарнирных элементов, расположенных вдоль основы и утка (рис. 4). Задача определения формы сводится к нахождению координат узлов поверхностной сети.

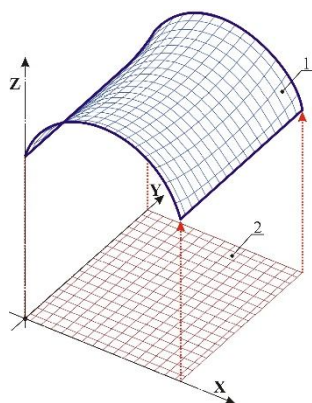


Рис. 4. Моделирование мягкой оболочки при помощи сетей:
1 – поверхностная сеть;
2 – базовая сеть

Fig. 4. Simulating the soft shell by means of mesh: 1 – surface mesh;
2 – base mesh

Из условия статического равновесия поверхностной сети, наложенной на оболочку, можно записать систему линейных уравнений относительно искомых координат. Блок системы уравнений, соответствующий узлу сети i [18, 22]:

$$\sum_j q_j \cdot (x_j - x_i) + F_x = 0, \quad (6,a)$$

$$\sum_j q_j \cdot (y_j - y_i) + F_y = 0, \quad (6,b)$$

$$\sum_j q_j \cdot (z_j - z_i) + F_z = 0, \quad (6,b)$$

где j – узлы, непосредственно соединяемые с узлом i , элементами сети; x, y, z – координаты узлов в глобальной системе координат; F_x, F_y, F_z – проекции на координатные оси внешней нагрузки, действующей в узле i ; q_j – т.н. «плотность силы» в элементе, соединяющем узлы i и j , являющаяся отношением продольного усилия N_j к длине элемента L_j в деформированном состоянии:

$$q_j = \frac{N_j}{L_j}. \quad (7)$$

Уравнения (6), записанные для всех свободных узлов, образуют систему, в которой число уравнений совпадает с числом неизвестных. Решение данной системы относительно искомых координат узлов поверхностной сети приведено в матричной форме в работе [22]. Для нахождения формы оболочки на этапе ее предварительного напряжения, при отсутствии внешних нагрузок, решение может быть записано следующим образом:

$$\vec{x} = -D^{-1} \cdot D_f \cdot \vec{x}_f, \quad (8,a)$$

$$\vec{y} = -D^{-1} \cdot D_f \cdot \vec{y}_f, \quad (8,b)$$

$$\vec{z} = -D^{-1} \cdot D_f \cdot \vec{z}_f, \quad (8,b)$$

где $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$ – вектора длиной n , содержащие искомые координаты узлов; n – число свободных узлов; $\vec{x}_f, \vec{y}_f, \vec{z}_f$ – вектора длиной n_f , содержащие из-

вестные координаты опорных (закрепленных) узлов сети; n_f – число опорных узлов; D , D_f – матрицы, вычисляемые по формулам [22]:

$$D = C^T \cdot Q \cdot C, \quad (9,a)$$

$$D_f = C^T \cdot Q \cdot C_f, \quad (9,b)$$

где Q – диагональная матрица размером $(m \times m)$, составленная из плотностей сил q , заданных для всех элементов сети; m – число элементов сети; C , C_f – подматрицы (блоки) матрицы G размером $(m \times n_s)$:

$$G = \begin{pmatrix} C & C_f \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где n_s – общее число узлов, $n_s = n + n_f$.

Для заполнения матрицы G узлы сети, наложенной на оболочку, получают сквозную нумерацию: сначала нумеруются свободные узлы (с неизвестными координатами), затем – закрепленные (рис. 5). Элементы матрицы определяются следующим образом: $G_{j,i} = 1$ – если узел i является начальным для элемента j , $G_{j,i} = -1$ – если узел i является конечным для элемента j , $G_{j,i} = 0$ – если узел i не принадлежит элементу j , где $i \in [1..n_s]$ и $j \in [1..m]$.

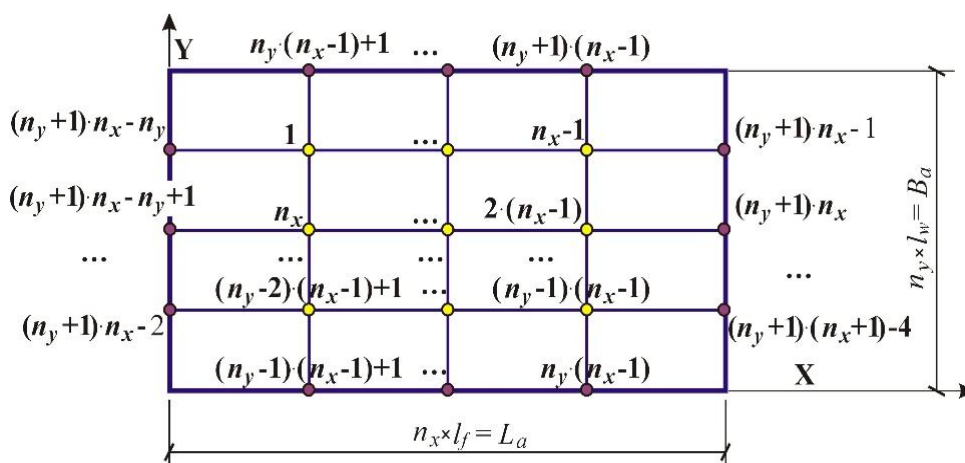


Рис. 5. Сеточный шаблон с нумерацией узлов: n_x , n_y – принятое число элементов сети вдоль осей X и Y

Fig. 5. Mesh template with node numbering: n_x , n_y – number of mesh cells along X and Y axes

Для определения плотности сил q , необходимых при формировании матриц D , вводится т.н. базовая сеть, лежащая в базовой плоскости, которой принадлежат опоры несущих арок (рис. 3, 4). Плотности сил находятся из следующих выражений в соответствии с рис. 6:

– для элементов, расположенных в направлении несущих нитей оболочки (направление «основы»):

$$q^w = \sigma_w \cdot \frac{l_f}{l_w}; \quad (11,a)$$

– для элементов, расположенных в направлении стабилизирующих нитей оболочки (направление «утка»):

$$q^f = \sigma_f \cdot \frac{l_w}{l_f}, \quad (11,6)$$

где l_w и l_f – размеры ячейки базовой сети; σ_w и σ_f – заданные мембранные напряжения (преднапряжения) в направлении основы и утка, соответственно.

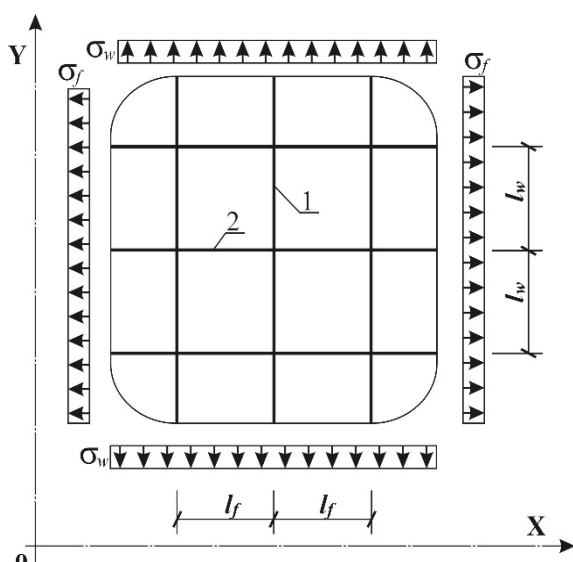


Рис. 6. Фрагмент базовой сети: 1, 2 – направления «основы» и «утка» мягкой оболочки (индексы 'w' и 'f', соответственно)

Рис. 6. Base mesh fragments: 1, 2 – “warp” and “weft” threads of the soft shell (indexes 'w' and 'f', respectively)

Анализ уравнений (8) показывает, что при отсутствии внешних нагрузок форма оболочки однозначно определяется соотношением мембранных напряжений k_σ , а не их абсолютными значениями:

$$k_\sigma = \frac{\sigma_w}{\sigma_f}. \quad (12)$$

Предложена итерационная методика определения требуемого соотношения мембранных напряжений, k_σ , из условия

обеспечения заданной высоты оболочки арочного типа $f_{f,req}$. При разработке методики применен метод хорд [26, 27].

Для апробации предложенной методики рассмотрены оболочки шириной B_a в интервале от 2,0 до 12,0 м с шагом 1,0 м, опирающиеся на вертикальные арки, расположенные вдоль оси X , и балки, лежащие вдоль оси Y . Арки и балки считаются бесконечно жесткими и имеющими неподвижные закрепления во всех промежуточных узлах. Пролет арок, L_a , принят равным 6,0 и 12,0 м. Отношения стрелы арок к пролету, k_a , составляют: 0,15, 0,20, 0,25, 0,30 и 0,40. Схема рассмотренных оболочек приведена на рис. 7.

Для оболочек, опирающихся на арки пролетом 6,0 м, относительная стрела нитей основы, k_w , принята равной 1/16, в то время как для оболочек, опирающихся на арки пролетом 12,0 м, принято значение $k_w=1/8$. С рассматриваемыми оболочками связаны базовые сети с размерами ячеек $l_f \times l_w = 0.2 \times 0.2$ м (рис. 5, 6).

Процентное расхождение заданной и полученной высот оболочки определяется следующим образом:

$$\Psi(k_{\sigma,c}) = \left(\frac{f_{f,c}}{f_{f,req}} - 1 \right) \cdot 100, \% \quad (13)$$

где $f_{f,c}$ – приближение к заданной высоте оболочки в центре сектора $f_{f,req}$, полученное методом плотности сил при текущем соотношении мембранных напряжений $k_{\sigma,c}$.

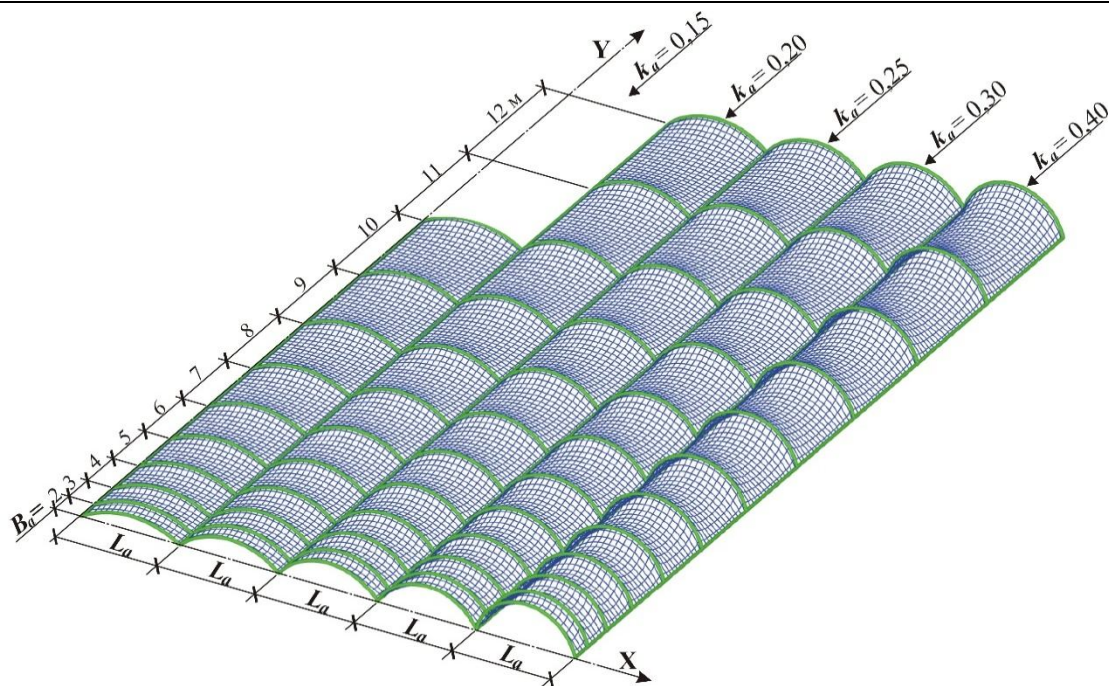


Рис. 7. Общий вид исследуемых оболочек арочного типа (аксонометрическая схема)

Fig. 7. General view of the arched shells under study (axonometric diagram)

Результаты и их обсуждение

Итерационный алгоритм определения соотношения мембранных напряжений, k_σ (12), обеспечивающего требуемую высоту в центре сектора оболочки арочного типа, состоит из двух этапов (рис. 8): определение начального диапазона поиска и минимизация величины ошибки (13).

На первом этапе левая и правая границы диапазона поиска, $k_{\sigma,L} \dots k_{\sigma,R}$, принимаются из условия:

$$\Psi(k_{\sigma,L}) \cdot \Psi(k_{\sigma,R}) \leq 0. \quad (14)$$

Задание начального диапазона осуществляется итерационным методом:

$$k_{\sigma,L} = \zeta^{-t}, \quad (15,a)$$

$$k_{\sigma,R} = \zeta^t, \quad (15,b)$$

где t – номер итерации; ζ – параметр, принятый равным 2,0.

Второй этап состоит из циклически выполняемой последовательности шагов:

– определение промежуточной точки $k_{\sigma,c}$:

$$k_{\sigma,c} = \frac{|\Psi(k_{\sigma,R})| \cdot k_{\sigma,L} + |\Psi(k_{\sigma,L})| \cdot k_{\sigma,R}}{|\Psi(k_{\sigma,R})| + |\Psi(k_{\sigma,L})|}; \quad (16)$$

– выбор наилучшего значения $k_{\sigma,B}$ для трех имеющихся точек ($k_{\sigma,L}$, $k_{\sigma,c}$ и $k_{\sigma,R}$), такого, что

$$\Psi(k_{\sigma,B}) = \min(|\Psi(k_{\sigma,L})|, \dots, |\Psi(k_{\sigma,c})|, |\Psi(k_{\sigma,R})|); \quad (17)$$

– проверка условия завершения процесса поиска решения:

$$|\Psi(k_{\sigma,B})| < \mu_\varepsilon, \quad (18)$$

где μ_ε – предельное относительное расхождение высот оболочки, %;

– при выполнении условия (18), итерационный процесс завершается, и, в качестве результата k_σ , принимается значение $k_{\sigma,B}$;

– при невыполнении условия (18), производится модификация границ диапазона поиска $k_{\sigma,L} \dots k_{\sigma,R}$ следующим образом: если $\Psi(k_{\sigma,R}) \cdot \Psi(k_{\sigma,c}) > 0$ отбрасывается часть диапазона правее точки $k_{\sigma,c}$, иначе – отбрасывается левая часть.

В соответствии с предложенной методикой найдены соотношения мембранных напряжений k_{σ} (12) для обеспечения высот оболочек (рис. 7), соответствующих заданным геометрическим параметрам (L_a , B_a , k_a и k_w). Предельное расхождение высот, μ_{ε} , принято

равным 0,1%. Результаты расчета приведены в табл. 1.

С целью оценки найденных соотношений мембранных напряжений, k_{σ} , выполнен поиск формы поверхности рассматриваемых секторов оболочек в лицензионном программном комплексе EASY.2020. Мембранные напряжения вдоль волокон утка оболочек приняты равными: $\sigma_f = 5.0$ кН/м. Мембранные напряжения вдоль волокон основы, σ_w , получены по (12), используя данные табл. 1.

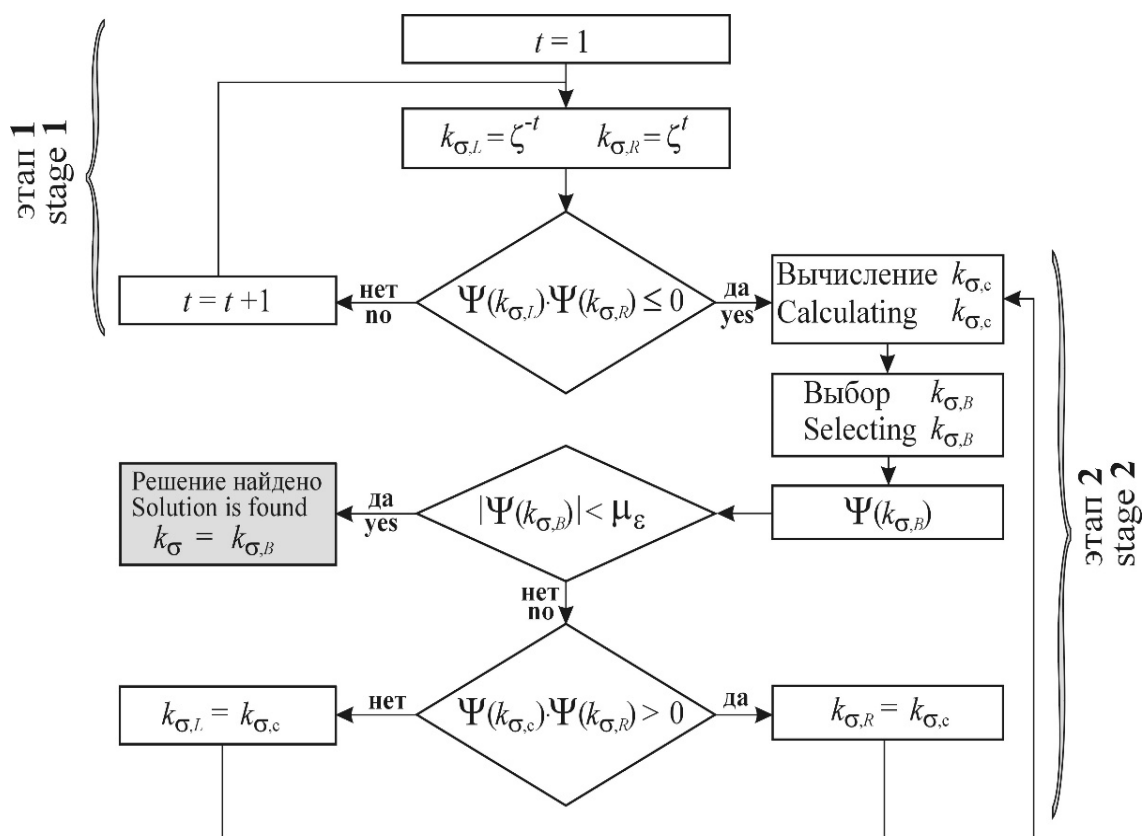


Рис. 8. Итерационный алгоритм поиска требуемого соотношения мембранных напряжений k_{σ}

Fig. 8. Iterative algorithm for finding membrane stress ratio k_{σ}

Таблица 1. Требуемые соотношения мембранных напряжений, k_σ **Table 1.** Required ratios of the membrane stresses, k_σ

Шаг арок, B_a , м / Arch spacing, B_a , m	Относительная стрела арок, k_a , - / Relative rise of the arches, k_a , -									
	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40
	Пролет арок $L_a=6,0$ м / Arch span is $L_a=6.0$ m					Пролет арок $L_a=12,0$ м / Arch span is $L_a=12.0$ m				
12,0	- ^{*)}	3,447	5,159	6,71	9,311	-	0,862	1,289	1,676	2,328
11,0	-	3,451	4,986	6,367	8,675	-	0,862	1,246	1,592	2,168
10,0	1,895	3,393	4,754	5,978	7,99	0,474	0,848	1,189	1,493	1,997
9,0	1,959	3,276	4,471	5,535	7,265	0,49	0,819	1,118	1,383	1,817
8,0	1,957	3,101	4,133	5,046	6,504	0,49	0,775	1,033	1,261	1,625
7,0	1,894	2,869	3,744	4,521	5,746	0,473	0,716	0,935	1,126	1,427
6,0	1,77	2,583	3,305	3,93	5,003	0,443	0,645	0,825	0,981	1,221
5,0	1,591	2,247	2,822	3,311	4,315	0,397	0,561	0,704	0,826	1,011
4,0	1,358	1,861	2,312	2,688	3,223	0,339	0,465	0,574	0,665	0,795
3,0	1,073	1,432	1,735	1,986	2,444	0,268	0,358	0,434	0,495	0,582
2,0	0,743	0,965	1,157	1,303	1,501	0,185	0,242	0,287	0,325	0,372
Примечание: - ^{*)} – условие (3), налагаемое на высоту оболочки в центре сектора, не выполнено Remark: - ^{*)} – condition (3), implied for the height at the center of the shell fragment, is not met										

Величина ошибки E определена по (13): $E = |\Psi(k_\sigma)|$. При этом, высота f_{fc} равна координате по оси Z узла, расположенного в центре сектора, полученной в специализированном лицензионном программном комплексе EASY.2020 при заданных мембранных напряжениях σ_w

и σ_f . Результаты расчета приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что максимальное отклонение высот в центре секторов оболочек, полученных в программном комплексе EASY.2020 по заданным мембранным напряжениям, от требуемых высот не превышает 0.77%.

Таблица 2. Отклонения требуемых высот в центре секторов оболочек от высот, полученных в программном комплексе EASY.2020 при заданных соотношениях мембранных напряжений, Е %**Table 2.** Discrepancies of the required shell heights at the center of the fragments and the heights by the EASY.2020 software given the membrane stress ratios, E %

Шаг арок, B_a , м / Arch spacing, B_a , m	Относительная стрела арок, k_a , - / Relative rise of the arches, k_a , -									
	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40
	Пролет арок $L_a=6,0$ м Arch span is $L_a=6.0$ m					Пролет арок $L_a=12,0$ м Arch span is $L_a=12.0$ m				
12,0	- ^{*)}	0,18	0,17	0,14	0,13	-	0,17	0,03	0,01	0,02
11,0	-	0,08	0,25	0,08	0,20	-	0,10	0,03	0,06	0,02
10,0	0,50	0,04	0,12	0,06	0,16	0,14	0,00	0,05	0,02	0,00
9,0	0,13	0,16	0,14	0,07	0,17	0,06	0,02	0,06	0,06	0,03
8,0	0,17	0,00	0,09	0,09	0,13	0,04	0,07	0,03	0,01	0,00
7,0	0,23	0,03	0,17	0,10	0,09	0,09	0,03	0,07	0,05	0,01
6,0	0,22	0,03	0,04	0,11	0,26	0,08	0,06	0,03	0,02	0,01
5,0	0,22	0,09	0,12	0,07	0,77	0,10	0,08	0,08	0,06	0,05
4,0	0,10	0,03	0,05	0,01	0,03	0,04	0,00	0,01	0,02	0,01
3,0	0,02	0,15	0,19	0,11	0,2	0,14	0,07	0,06	0,07	0,03
2,0	0,06	0,01	0,06	0,11	0,14	0,11	0,03	0,03	0,00	0,02
Примечания: - ^{*)} – условие (3), налагаемое на высоту оболочки в центре сектора, не выполнено; максимальные отклонения выделены жирным шрифтом Remarks: - ^{*)} – condition (3), implied for the height at the center of the shell fragment, is not met; the maximum discrepancy is highlighted in bold										

Выводы

Разработана итерационная методика поиска соотношения мембранных напряжений в тентовой оболочке арочного типа из условия обеспечения требуемой высоты в центре сектора. Эффективность

методики подтверждена численным моделированием с применением специализированного лицензионного программного комплекса EASY.2020.

Разработанная методика способствует упрощению процесса исследования и проектирования тентовых кон-

струкций, позволяя напрямую задать требуемые геометрические параметры.

Дальнейшее развитие предложенной методики включает анализ много-

секционных тентовых покрытий с учетом податливости опорных арок, находящихся между смежными секциями.

Список литературы

1. Analysis and design of fabric membrane structures: a systematic review on material and structural performance / J. Xu, Y. Zhang, Q. Yu, L. Zhang // *Thin-Walled Structures*. 2022. №. 170. P. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108619>
2. Experimental and simulation analysis of the initial shape of a large-span air-supported membrane structure / L. Xiongyan, Z. Zhang, Q. Chu, S. Xue, H. Yanli // *Thin-Walled Structures*. 2022. Vol. 178. Article 109491. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109491>
3. Monticelli C. Membrane claddings in architecture // Llorens J.I., editor. Woodhead publishing series in textiles, fabric structures in architecture: Woodhead Publishing, 2015. P. 449-480. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-233-4.00014-0>
4. Barozzi M., Viscuso S., Zanelli A. Design novel covering system for archaeological areas // *Proceedings of VII International Conference on textile composites and inflatable structures. Structural membranes 2015. Barcelona, Spain, 2015*. P. 105-114. URL: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/109301> (дата обращения: 24.02.2024)
5. Llorens J., Zanelli A. Structural membranes for refurbishment of the architectural heritage // *Procedia Engineering*. 2016. № 155. P. 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.003>
6. Llorens J.I. Structural membranes for urban spaces // *Proceedings of VII International Conference on textile composites and inflatable structures. Structural membranes 2015. Barcelona, Spain, 2015*. P. 133 – 144. URL: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/109310> (дата обращения: 24.02.2024)
7. Метод расчета напряженно-деформированного состояния вантовооболочечных конструкций космических антенных рефлекторов / А.В. Бельков, С.В. Белов, А.П. Жуков, М.С. Павлов, С.В. Пономарев, С.А. Кузнецов // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2019. № 62. С. 5-18. <https://doi.org/10.17223/19988621/62/1>
8. Form-finding and shape adjustment of cable-membrane reflectors / J. Du, F. Wang, H. Bao, D. Ge, Z. Ren // *Acta Astronautica*. 2023. Vol. 205. P. 213-224. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.02.002>
9. Vazquez E., Correa D., Poppinga S. A review of and taxonomy for elastic kinetic building envelopes // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 82. Article 108227. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108227>

10. Hegyi D. Numerical stability analysis of arch-supported membrane roofs // *Structures*. 2021. № 29. P. 785-795. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.025>
11. Wagner R. *Bauen mit seilen und membranen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016. 517 p. (In German)
12. Еремеев П.Г. Тентовые мембраны для ограждающих конструкций покрытий над трибунами стадионов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 4. С. 33-36. URL: <http://www.pgsl923.ru/ru/index.php?m=4&y=2015&v=04&p=00&r=06> (дата обращения: 24.02.2024)
13. Safety and serviceability of membrane buildings: a critical review on architectural, material and structural performance / J. Hu, W. Chen, Y. Qu, D. Yang // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 210. Article 110292. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110292>
14. Analysis of wrinkled membrane structures using a plane stress projection procedure and the dynamic relaxation method / H. Le Meitour, G. Rio, H. Laurent, A.S. Lectez, P. Guigue // *International Journal of Solids and Structures*. 2021. Vol. 208–209. P. 194-213. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.10.026>
15. Численное моделирование конструкций сооружений башенного типа в программных комплексах ANSYS и Лира-Сапр / А.Д. Зиганшин, Л.Ш. Ахтямова, Л.С. Сабитов, О.В. Радайкин, И.К. Киямов // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2021. № 2. С. 65-67. URL: <https://ntvprrt.ru/ru/archive-vypuskov> (дата обращения: 24.02.2024)
16. Industrial design and analysis of structural membranes / E. Haug, P. De Kermel, B. Gawenat, A. Michalski // *International Journal of Space Structures*. 2009. Vol. 24. № 4. P. 191 - 204. <https://doi.org/10.1260/026635109789968227>
17. Nonlinear two-dimensional analysis of manifold marine inflated membrane structures using vector form intrinsic finite element method / X. Gao, Z. Cheng, L. Cao, W. Tang // *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 271. Article 113813. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113813>
18. Strobel D., Singer P., Holl J. Analytical formfinding // *International Journal of Space Structures*. 2016. Vol. 31, №. 1. P. 52 - 61. <https://doi.org/10.1177/0266351116642076>
19. Kabasi S., Marbaniang A.L., Ghosh S. Form-finding of tensile membrane structures with strut and anchorage supports using physics-informed machine learning // *Engineering Structures*. 2024. Vol. 299. Article 117093. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117093>
20. Kabasi S., Marbaniang A.L., Ghosh S. Physics-informed neural networks for the form-finding of tensile membranes by solving the Euler–Lagrange equation of minimal surfaces // *Thin-Walled Structures*. 2023. Vol. 182, part B. Article 110309. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110309>
21. A unified adaptive approach for membrane structures: form finding and large deflection isogeometric analysis / T.N. Nguyen, T.D. Hien, T.T. Nguyen, J. Lee // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2020. Vol. 369. Article 113239. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113239>

22. Расчет напряженно-деформированного состояния вантово-оболочечных конструкций с учетом размеростабильности вантовых элементов / А.В. Бельков, С.В. Белов, А.П. Жуков, М.С. Павлов, С.В. Пономарев // Современные строительные материалы и технологии: сборник научных статей / под ред. М.А. Дмитриевой. Калининград, 2023. С. 143-150. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50475277> (дата обращения: 24.02.2024)

23. The modified force density method for form-finding of cable net structure / X. Li, C. Liu, S. Xue, X. Li, C. Zhang, L. Huang, W. Wang // *Thin-Walled Structures*. 2024. Vol. 195. Article 111363. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111363>

24. Strobel D., Holl J. On the calculation of textile halls // *Proceedings of X International Conference on textile composites and inflatable structures. Structural membranes 2021. Munich, Germany, 2021. 7 p.* <https://doi.org/10.23967/membranes.2021.043>

25. Llorens J.I. Appropriate design of structural membranes // *Proceedings of X International Conference on textile composites and inflatable structures. Structural membranes 2021. Munich, Germany, 2021. 12 p.* <https://doi.org/10.23967/membranes.2021.008>

26. A significant improvement of a family of secant-type methods / J.A. Ezquerro, M.A. Hernández-Verón, Á.A. Magreñán, A. Moysi // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2023. Vol. 424. Article 115002. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2022.115002>

27. Шелопугина Е.О., Козлова О.В. Визуализация метода хорд для поиска приближенных корней нелинейного уравнения в MS Excel // *Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы VI Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. Комсомольск-на-Амуре, 2023. С. 525-528.* URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54332651> (дата обращения: 24.02.2024)

References

1. Xu J., Zhang Y., Yu Q., Zhang L. Analysis and design of fabric membrane structures: a systematic review on material and structural performance. *Thin-Walled Structures*. 2022; (170): 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108619>

2. Xiongyan L., Zhang Z., Chu Q., Xue S., Yanli H. Experimental and simulation analysis of the initial shape of a large-span air-supported membrane structure. *Thin-Walled Structures*. 2022; 178: Article 109491. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109491>

3. Monticelli C. Membrane claddings in architecture. In: *Llorens J.I. (ed.) Woodhead publishing series in textiles, fabric structures in architecture*: Woodhead Publishing; 2015: 449-480. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-233-4.00014-0>

4. Barozzi M., Viscuso S., Zanelli A. Design novel covering system for archaeological areas. *VII International Conference on textile composites and inflatable structures. Structural*

al membranes 2015: Proceedings. 2015: 105-114. Available at: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/109301> (accessed 24.02.2024)

5. Llorens J., Zanelli A. Structural membranes for refurbishment of the architectural heritage. *Procedia Engineering*. 2016; (155): 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.003>

6. Llorens J.I. Structural membranes for urban spaces. In: *VII International Conference on textile composites and inflatable structures. Structural membranes 2015. Proceedings*. 2015: 133 – 144. Available at: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/109310> (accessed 24.02.2024)

7. Bel'kov A.V., Belov S.V., Zhukov A.P., Pavlov M.S., Ponomarev S.V., Kuznetsov S.A. Method for calculating the stress-strain state of cable-stayed shell structures of space antenna reflectors. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika = Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2019; (62): 5-18. (In Russ.) <https://doi.org/10.17223/19988621/62/1>.

8. Du J., Wang F., Bao H., Ge D., Ren Z. Form-finding and shape adjustment of cable-membrane reflectors. *Acta Astronautica*. 2023; 205: 213-224. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.02.002>.

9. Vazquez E., Correa D., Poppinga S. A review of and taxonomy for elastic kinetic building envelopes. *Journal of Building Engineering*. 2024; 82: Article 108227. <https://doi.org/10.1016/j.jobeb.2023.108227>.

10. Hegyi D. Numerical stability analysis of arch-supported membrane roofs. *Structures*. 2021; (29): 785-795. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.025>

11. Wagner R. Bauen mit seilen und membranen. Berlin: Beuth Verlag GmbH. 2016. 517 p. (In German)

12. Ereemeev P.G. Fabric membranes for roof structures over stadium stands. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2015; (4): 33-36. (In Russ.). Available at: <http://www.pgs1923.ru/ru/index.php?m=4&y=2015&v=04&p=00&r=06> (accessed 24.02.2024).

13. Hu J., Chen W., Qu Y., Yang D. Safety and serviceability of membrane buildings: a critical review on architectural, material and structural performance. *Engineering Structures*. 2020; 210: Article 110292. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110292>.

14. Le Meitour H., Rio G., Laurent H., Lectez A.S., Guigue P. Analysis of wrinkled membrane structures using a plane stress projection procedure and the dynamic relaxation method. *International Journal of Solids and Structures*. 2021; 208–209: 194-213. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.10.026>.

15. Ziganshin A.D., Akhtyamova L.Sh., Sabitov L.S., Radaikin O.V., Kiyamov I.K. Numerical simulating of tower-type structures in ANSYS and Lira-Sap software packages. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya = Scientific and technical Volga region bulletin*.

2021; (2): 65-67. (In Russ.). Available at: <https://ntvprr.ru/ru/archive-vypuskov> (accessed 24.02.2024).

16. Haug E., De Kermel P., Gawenat B., Michalski A. Industrial design and analysis of structural membranes. *International Journal of Space Structures*. 2009; 24 (4): 191 - 204. <https://doi.org/10.1260/026635109789968227>.

17. Gao X., Cheng Z., Cao L., Tang W. Nonlinear two-dimensional analysis of manifold marine inflated membrane structures using vector form intrinsic finite element method. *Ocean Engineering*. 2023; 271: article 113813. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113813>.

18. Strobel D., Singer P., Holl J. Analytical formfinding. *International Journal of Space Structures*. 2016; 31(1): 52 - 61. <https://doi.org/10.1177/0266351116642076>.

19. Kabasi S., Marbaniang A.L., Ghosh S. Form-finding of tensile membrane structures with strut and anchorage supports using physics-informed machine learning. *Engineering Structures*. 2024; 299: article 117093. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117093>

20. Kabasi S., Marbaniang A.L., Ghosh S. Physics-informed neural networks for the form-finding of tensile membranes by solving the Euler–Lagrange equation of minimal surfaces. *Thin-Walled Structures*. 2023; 182, part B: article 110309. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110309>.

21. Nguyen T.N., Hien T.D., Nguyen T.T., Lee J. A unified adaptive approach for membrane structures: form finding and large deflection isogeometric analysis. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2020; 369: article 113239. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113239>.

22. Bel'kov A.V., Belov S.V., Zhukov A.P., Pavlov M.S., Ponomarev S.V. Calculation of the stress-strain state of cable-stayed shell structures taking into account the dimensional stability of cable-stayed elements. In: Dmitrieva M.A., editor. *Sovremennye stroitel'nye materialy i tekhnologii. Sbornik nauchnykh statei = Modern building materials and technologies. Collection of scientific articles*. Kaliningrad, 2023. P. 143-150. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50475277> (accessed 24.02.2024).

23. Li X., Liu C., Xue S., Li X., Zhang C., Huang L., Wang W. The modified force density method for form-finding of cable net structure. *Thin-Walled Structures*. 2024; 195: article 111363. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111363>.

24. Strobel D., Holl J. On the calculation of textile halls. *X International Conference on textile composites and inflatable structures. Structural membranes 2021. Munich, Germany. Proceedings*. 2021. 7 p. <https://doi.org/10.23967/membranes.2021.043>.

25. Llorens J.I. Appropriate design of structural membranes. *X International Conference on textile composites and inflatable structures. Structural membranes 2021. Munich, Germany. Proceedings*. 2021. 12 p. <https://doi.org/10.23967/membranes.2021.008>.

26. Ezquerro J.A., Hernández-Verón M.A., Magreñán Á.A., Moysi A. A significant improvement of a family of secant-type methods. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2023; 424: article 115002. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2022.115002>.

27. Shelopugina E.O., Kozlova O.V. Secant method visualization for finding approximate roots of a nonlinear equation in MS Excel. In: *Materialy VI Vserossiiskoi natsional'noi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh. Molodezh' i nauka: aktual'nye problemy fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy = VI all-Russian National Scientific Conference of Young Scientists. Youth and science: current problems of fundamental and applied research. Proceedings*. Komsomol'sk-na-Amure, 2023. P. 525-528. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54332651> (accessed 24.02.2024)

Информация об авторах / Information about the Authors

Чесноков Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного производства, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Российская Федерация, e-mail: andreychess742@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3687-0510>, Researcher ID: U-4758-2018, Author ID: 57170021900, SPIN: 1609-9249

Andrei V. Chesnokov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Building Production Department, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation, e-mail: andreychess742@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3687-0510>, Researcher ID: U-4758-2018, Author ID: 57170021900, SPIN: 1609-9249

Михайлов Виталий Витальевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного производства, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Российская Федерация, e-mail: mmvv46@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8274-9346>, Researcher ID: ISU-9851-2023, Author ID: 57215327886, SPIN: 9291-8589

Vitalii V. Mikhailov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Building Production Department, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation, e-mail: mmvv46@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8274-9346>, Researcher ID: ISU-9851-2023, Author ID: 57215327886, SPIN: 9291-8589

УДК 535.648.01

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-56-70>

Один из вариантов управления системой теплоснабжения зданий и сооружений с применением методов математического анализа

К. В. Жилина¹, Д. Н. Тютюнов¹, А. П. Бурцев¹ ✉

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ap_burtsev@mail.ru

Резюме

Цель исследования. В предлагаемой публикации в качестве цели исследования выбраны два основных фактора, которые включают в себя комплексный анализ функционирования зависимой системы теплоснабжения зданий и сооружений и синтез схемы управления распределением ресурсов указанной системы путем применения математических методов и создания соответствующих алгоритмов регулирования тепловых потоков.

Методы. Для формирования оптимальной стратегии использовались методы математического анализа и дифференциальные уравнения теплового баланса. Такой подход позволил провести детальное описание нестационарного режима функционирования зависимой системы отопления зданий и сооружений с учетом температурной динамики тепловой нагрузки и окружающей среды. Попутно проведено исследование полученных теоретических результатов. Были учтены переходные процессы при введении проектируемой схемы управления в эксплуатацию. Широко использовалась теория подобия для формирования выходной рабочей формулы при организации теплоснабжения. Полученное соотношение позволило сформировать алгоритмы управления обеспечением тепла зданий и сооружений. Такой подход дал возможность для синтеза схем регулирования тепловых потоков на основе принципов распределения ресурсов по варианту эксплуатации «умного дома» для применения на практике.

Результаты. В ходе исследования получена рабочая формула управления процессом теплоснабжения зданий и сооружений. На ее основе были синтезированы соответствующие функциональные схемы, учитывающие динамику изменения температурных режимов в тепловой нагрузке и внешней среде.

Закключение. Полученные результаты дают возможность применять принципы управления «умным домом» на практике. В заключение исследования сформулированы основные выводы и рекомендации по управлению системой теплоснабжения с применением методов математического анализа.

Ключевые слова: система; теплоснабжение; модель; тепломассообмен; алгоритм; эффективность; схема; теплопотребление; регулирование.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Жилина К. В., Тютюнов Д. Н., Бурцев А. П., 2024

Для цитирования: Жилина К. В., Тютюнов Д. Н., Бурцев А. П. Один из вариантов управления системой теплоснабжения зданий и сооружений с применением методов математического анализа // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №2. С. 56-70. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-56-70>.

Поступила в редакцию 04.03.2024

Подписана в печать 15.04.2024

Опубликована 25.06.2024

One of the options for managing the heat supply system of buildings and structures using mathematical analysis methods

Kira V. Zhilina ¹, Dmitriy N. Tyutyunov ¹, Alexey P. Burtsev ¹ ✉

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: ap_burtsev@mail.ru

Abstract

Purpose of research. In the proposed publication, two main factors are selected as the purpose of the study, which include a comprehensive analysis of the functioning of a dependent heat supply system for buildings and structures and the synthesis of a control scheme for the distribution of resources of the specified system by applying mathematical methods and creating appropriate algorithms for regulating heat flows.

Methods. Methods of mathematical analysis and differential equations of thermal balance were used to form the optimal strategy. This approach made it possible to carry out a detailed description of the non-stationary mode of operation of the dependent heating system of buildings and structures, taking into account the temperature dynamics of the thermal load and the environment. Along the way, a study of the theoretical results obtained was conducted. Transients were taken into account when putting the projected control scheme into operation. The theory of similarity was widely used to form the output working formula for the organization of heat supply. The obtained ratio made it possible to form algorithms for managing the provision of heat to buildings and structures. This approach made it possible to synthesize heat flow control schemes based on the principles of resource allocation according to the smart home operation option for practical use.

Results. In the course of the study, a working formula was obtained for the control of the heat supply process of buildings and structures. On its basis, appropriate functional schemes were synthesized, taking into account the dynamics of changes in temperature conditions in the thermal load and the external environment.

Conclusion. The results obtained make it possible to apply the principles of smart home management in practice. At the end of the study, the results of the work will be summarized, as well as the main conclusions and recommendations for managing the heat supply system using mathematical analysis methods will be formulated. Also, in conclusion, an assessment of the effectiveness of the proposed solutions and their impact on the economy and the environment can be given.

Keywords: system; heat supply; model; heat and mass transfer; algorithm; efficiency; scheme; heat consumption; regulation.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Zhilina K. V., Tyutyunov D. N., Burtsev A. P. One of the options for managing the heat supply system of buildings and structures using mathematical analysis methods. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(2): 56-70 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-56-70>.

Received 04.03.2024

Accepted 15.04.2024

Published 25.06.2024

Введение

К одной из важных проблем современности в общем списке технических задач можно отнести совершенствование ресурсосберегающих технологий с одновременным обеспечением экологической безопасности.

Практика показывает, что при внедрении указанных вопросов особое преимущество имеют комплексы автома-

тического регулирования в системах горячего водоснабжения и отопления зданий и сооружений, позволяющие уменьшить расходы тепловой энергии в пределах от 10...30% [1, 2, 3, 4].

Из опыта эксплуатации, при внедрении упомянутой технологии наиболее оптимальной показала себя открытая система теплоснабжения, зависимо соединенная подающей магистралью к тепловым сетям (рис. 1).

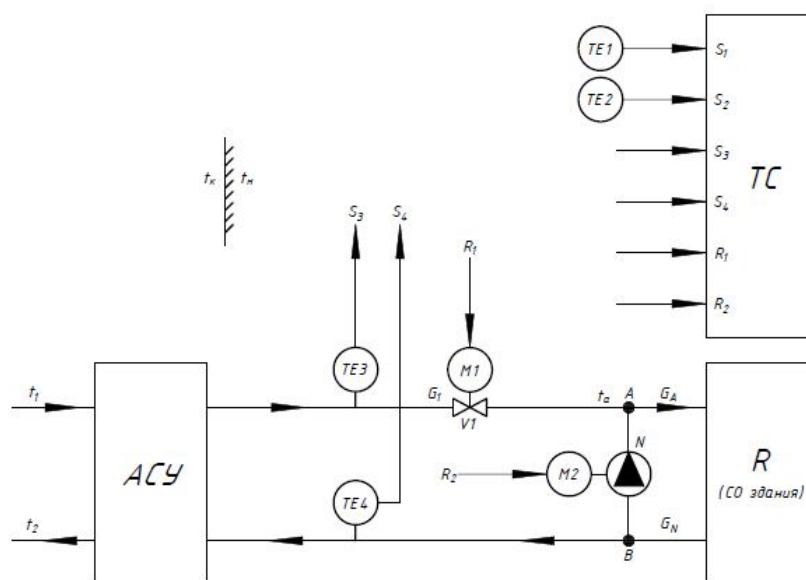


Рис. 1. Рабочая функциональная схема регулирования открытой зависимой системы теплоснабжения: **АСУ** – автоматизированная система учета, содержащая узел учета тепловой энергии с комплексом измерительного оборудования; **ТС** – контроллер параметров теплосети; **V₁** – регулирующий клапан; **M₁** – электропривод клапана; **N** – циркуляционный насос; **M₂** – электропривод насоса; **TE₁** – выносной датчик температуры наружной окружающей среды t_k ; **TE₂** – контактный датчик температуры в обогреваемом помещении t_k ; **R** – тепловая нагрузка; **TE₃** – погружной датчик температуры теплоносителя t_1 в подающем трубопроводе; **TE₄** – погружной датчик температуры теплоносителя t_2 в обратной трубе

Fig. 1. Working functional scheme of regulation of an open dependent heat supply system: **ACS** – an automated metering system containing a thermal energy metering unit with a set of measuring equipment; **TC** – a controller of heating network parameters; **V₁** – a control valve; **M₁** – electric valve actuator; **N** – circulation pump; **M₂** – electric pump drive; **TE₁** – external ambient temperature sensor t_k ; **TE₂** – contact temperature sensor in a heated room t_k ; **R** – thermal load; **TE₃** – submersible coolant temperature sensor t_1 in the supply pipeline; **TE₄** – a submersible coolant temperature sensor t_2 in the return pipe

Предлагаемый вариант распределения тепла имеет предпочтение в сравнении с независимой, в виду отсутствия необходимости применения теплообменного оборудования, групп подпиточных насосов и расширительного бака.

Следует отметить, что такой подход регулировки отопления содержит некоторую опасность для системы теплоснабжения при гидроударе в обратном трубопроводе, в случае достижения аварийного значения [2]. Это может привести к выходу из строя целого ряда теплоэнергетического оборудования.

В реальной действительности основная часть современных эксплуатируемых объектов таких, как АЭС, ТЭЦ, ГЭС защищают магистральные теплопроводы от аварийных ситуаций.

Отметим, что указанные значения температур носят номинальный характер: $t_1 = 80...150^{\circ}\text{C}$, $t_k = 20...22^{\circ}\text{C}$; $t_2 = 60...70^{\circ}\text{C}$; температура наружного воздуха t_N определяется в соответствии с СП 131.13330.2020 «Строительная климатология».

Материалы и методы

Динамика теплоснабжения требует использования горячего теплоносителя, температура которого должна иметь номинальное значение t_1 . Он поступает из тепловой магистрали на регулирующий клапан V_1 , который управляет процессом регулирования подачи тепла в тепловую нагрузку R , для поддержа-

ния нормативной номинальной температуры t_k в ней (зданий и сооружений).

Процесс поддержания температуры t_k управляется за счет запитки контура ARBA горячим теплоносителем в точке А. Обеспечение циркуляции осуществляется с помощью насоса N, который подмешивает горячий теплоноситель в необходимом объеме. В результате теплоотдачи в обратный трубопровод поступает охлажденный теплоноситель с номинальной температурой t_2 ^{1,2} [2, 5-9].

В научных работах [5-15] предлагаемый подход позволяет описать основные особенности процесса передачи тепла определенными функциями, включающими координаты и время. Тогда мы можем представить нашу модель в виде ряда решений для различных задач конвекции тепла, вызванной определенными факторами.

Для представления процесса теплоснабжения в виде математической модели необходимо учесть следующие параметры:

– геометрические характеристики участка трубы (внешний d_1 и внутренний d_2 диаметр, м; длина контура l , м);

¹ Федоров С. С. Управление системой многоконтурного теплоснабжения зданий при зависимом подключении к тепловым сетям: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2016. 16 с.

² Федоров С. С. Управление системой многоконтурного теплоснабжения зданий при зависимом подключении к тепловым сетям: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2016. 171 с.

- физические свойства среды (теплоемкость c , Дж/кг·°C; теплопроводность λ , Вт/м·°C; плотность ρ , кг/м³);
- интенсивность тепловых потерь (объемная плотность тепловыделений q_v , Вт/м³; тепловой поток q , Вт/м²);
- условия теплообмена на границах участка.

Математическая модель процесса тепломассопереноса может быть представлена в виде системы уравнений Навье-Стокса для описания движения среды $\vec{\omega}$ за время τ и температуры t в ортогональной системе координат x, y, z , а также уравнения энергии для определения температурного поля и граничных условий, учитывающих теплообмен на стенках трубы:

$$\frac{dt}{d\tau} = \Delta t + q_v - q, \quad (1)$$

где $\frac{dt}{d\tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial t}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial t}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial t}{\partial z}$ – субстанциональная производная, связанная с описанием движущейся среды со скоростью $\vec{\omega} = (\omega_x; \omega_y; \omega_z)$, при этом $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции вектора скорости теплоносителя $\vec{\omega}$, м/с; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа [10, 11].

В результате решения данной системы уравнений можно определить распределение температуры внутри участка трубы, а также потери тепла на каждом участке. Это позволит оптимизировать процесс теплоснабжения, минимизировать потери тепла и обеспе-

чить требуемый температурный режим в помещении.

Попутно отметим, что ось абсцисс содержит начало координат и направлена вдоль оси трубы. Одновременно оси ординат и аппликат исходят из указанного начала в плоскости, нормальной к оси абсцисс (оси трубы) [6].

Полагая, что температурные параметры в зависимой системе изменяются во времени, рассмотрим нестационарный режим работы контура ARBA. В этом случае перемещение рабочего тепла происходит вдоль оси абсцисс, и в произвольном сечении $\tilde{x}$ его расход G_1 и температура t_1 изменяются во времени, то есть справедливы соотношения: $\frac{\partial t}{\partial \tau} \neq 0$, $\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0$, $\Delta t = 0$. Учитывая, что в большинстве случаев величина q_v практически отсутствует, соотношение (1) примет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = -\frac{q}{c\rho}. \quad (2)$$

Для стальных электросварных труб по ГОСТ 10704-91 «Трубы стальные электросварные прямошовные» отношение диаметров имеет отношение: $\frac{d_1}{d_2} > 0,98$.

Тепловой поток q (Вт) через единицу поверхности трубопровода, характеризующейся эффективным диаметром d_x (м) при условии $d_x = d_2$ и длиной l (м) с учетом приведенного коэффициента теплопередачи трубопроводного контура и контура потребителя $k_{тр}$ (Вт/м²·°C)

при разнице температур между горячим теплоносителем и температурой внутри объекта с тепловой нагрузкой R может быть представлен в виде:

$$q \approx k_{mp} \cdot \pi \cdot d_x \cdot l \cdot (t - t_k). \quad (3)$$

Для определения интенсивности тепловых потерь q указанный коэффициент k_{tr} следует привести к единице площади внешней цилиндрической поверхности трубы диаметром d_2 и длиной l . В этом случае k_{tr} достаточно разделить на величину этой площади $\pi \cdot d_2 \cdot l$. С учетом указанного, подставляя (3) в (2), получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= - \frac{k_{mp} \cdot \pi \cdot d_2 \cdot l \cdot (t - t_k)}{\pi \cdot d_2 \cdot l \cdot c\rho} = \\ &= - \frac{k_{mp} \cdot (t - t_k)}{c\rho}. \end{aligned} \quad (4)$$

Преобразуем (4) в виде:

$$- \frac{k_{mp} (t - t_k)}{c\rho} = - \frac{(t - t_k)}{\frac{c\rho}{k_{mp}}}. \quad (5)$$

Введем обозначения:

$$\frac{c\rho}{k_{mp}} = \frac{T_n}{K}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), имеем:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = - \frac{K(t - t_k)}{T_n}. \quad (7)$$

Одномерная функция $t = f(\tau)$ при учете постоянной времени тепловой нагрузки T_n и коэффициента усиления температурного напора в системе теплоснабжения K , являющимся константой пропорциональным отношению температур в подающем и обратном трубопроводах t_2/t_1 и зависящем от геометрических и

физических свойств тепловой нагрузки, может быть записана в виде:

$$K_t + T_n \frac{dt}{d\tau} = K t_k. \quad (8)$$

Проинтегрируем дифференциальное уравнение (8) с учетом постоянной времени τ и времени запаздывания τ_0 для произвольного сечения с координатой $\tilde{x} = l$ контура трубопровода, соответственно имеющей температуру t_1 в виде одного из граничных условий¹ [7, 16, 17, 18, 3, 4] (рис. 2).

$$\int_{t_1}^t \frac{d(t - t_k)}{t - t_k} = - \frac{K}{t_N} \int_{\tau_0}^{\tau} d\tau, \quad (9)$$

$$t = t_k + (t_1 - t_k) \exp \left(- \frac{K}{t_N} (\tau - \tau_0) \right). \quad (10)$$

)

Из условия $\tau \rightarrow \infty$ следует $K \rightarrow 1$, что приводит к соотношению:

$$t = t_k + (t_1 - t_k) \exp \left(- \frac{\tau - \tau_0}{t_N} \right). \quad (11)$$

Известно, что общее решение соотношения (1), соответствующее сечению $\tilde{x} = l$, имеет вид:¹

$$\tilde{t} = C_1 e^{a_1 \tilde{x}} + C_2 e^{a_2 \tilde{x}} + t_k, \quad (12)$$

где $C_1, C_2, a_1, a_2 - const$, причем a_1 и a_2 определяются из эксперимента за счет варьирования значениями $\tilde{x}$ и $\tilde{t}$ в соотношении (12).

¹ Федоров С. С. Управление системой многоконтурного теплоснабжения зданий при зависимом подключении к тепловым сетям: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2016. 171 с.

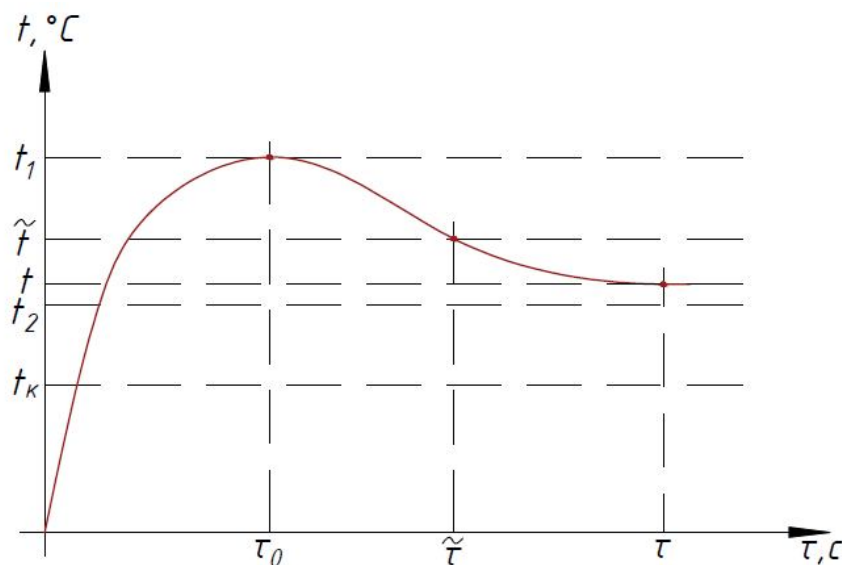


Рис. 2. Температурная характеристика рабочего тела; $\tilde{t}$, t_1 , t_2 , t_k – номинальные параметры системы отопления, °C

Fig. 2. Temperature characteristics of the working fluid; $\tilde{t}$, t_1 , t_2 , t_k – nominal parameters of the heating system, °C

В случае, если $\tilde{x} = l = 0$, то $\tilde{x} = \tilde{x}_A = 0$ получим значение температуры рабочего тела в точке А – начальной границе тепловой нагрузки, причем:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{(t_1 - t_k) \exp(a_2 l) - (t_2 - t_k)}{\exp(a_2 l) - 1} \\ C_2 = -\frac{(t_1 - t_k) \exp(a_1 l) - (t_2 - t_k)}{\exp(a_1 l) - 1} \end{cases} \quad (13)$$

Подставляя (12) в (11), (11) – в (10), имеем:

$$\tilde{t} = t_k + (t_1 - t_k) \exp\left(-\frac{K(\tau - \tau_0)}{t_N}\right). \quad (14)$$

Важно отметить, что дифференциальное уравнение (8) соответствует апериодическому (инерционному) звену 1-го рода. В данном случае имеем передаточную функцию $w_1(C)$, характеризующую переходный процесс при подключении системы отопления:

$$w_1(C) = \frac{K}{1 + Ct_N}, \quad (15)$$

где C – параметр; K – коэффициент усиления, который определяет перепад температуры между подающим и обратным трубопроводом.

Соответствующая переходная функция имеет вид:

$$h(\tau) = K \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau}{t_N}\right) \right). \quad (16)$$

Кроме того, имеет место наличие звена чистого запаздывания с передаточной функцией $w_2(C)$ и временем чистого запаздывания τ_0 , с:

$$w_2(C) = \exp^{-C\tau_0}. \quad (17)$$

Учитывая (16) и (17) функциональную схему объекта теплоснабжения, можно представить в виде цепочки апериодического звена 1-го порядка и звена чистого запаздывания $w(C)$ [10].

Согласно (14) и (15) получим итоговую передаточную функцию $w(C)$ в виде:

$$w(C) = w_1(C) \cdot w_2(C) = \frac{K \exp^{-C\tau_0}}{1 + Ct_N}. \quad (18)$$

Параметры t_N , τ_0 , C , K могут быть определены опытным путем с учетом геометрических характеристик, тепловой нагрузки и физико-химических свойств теплоносителя.

Из исследования [10] и зависимости (6) следует, что значение t_N прямо пропорционально плотности и удельной теплоемкости горячего теплоносителя и обратно пропорционально коэффициенту теплопередачи k_{mp} контура системы теплоснабжения (тепловая нагрузка R).

Если учесть, что при теплоснабжении объекта часть тепла неизбежно теряется, то справедливо представить уравнение теплового баланса в виде

$$Q_k = \eta Q, \quad (19)$$

где η – КПД системы теплоснабжения; Q – тепловой поток, поступающий для обогрева через поверхность теплообмена, Вт; Q_k – тепловой поток на нагревание тепловой нагрузки R , Вт, причем:

$$Q = \bar{c}_p G_1 (t_1 - t_2), \quad (20)$$

где $\bar{c}_p$ – средняя удельная теплоемкость рабочего тела в интервале температур $[t_2; t_1]$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ \text{C}}$; G_1 – расход горя-

чего теплоносителя по массе в подающем трубопроводе, кг/с.

$$Q_k = k_n F (t_k - t_n), \quad (21)$$

где k_n – коэффициент теплопередачи поверхности теплообмена, $\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}$; F – площадь поверхности теплообмена, м^2 .

Следует отметить, что упомянутая величина $\bar{c}_p$ в интервале температур $[50^\circ \text{C}, 70^\circ \text{C}]$ имеет разброс $\pm 0,31\%$ от границ указанного интервала, поэтому достаточно воспользоваться средним значением:

$$\begin{aligned} \bar{c}_p &= (4,174 + 4,187) \cdot 10^3 / 2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ \text{C}} = \\ &= 4,1805 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ \text{C}}. \end{aligned}$$

Подставляя (20) и (21) в (19), получим:

$$k_n F (t_k - t_n) = \eta \bar{c}_p G_1 (t_1 - t_2). \quad (22)$$

Выражение (21) позволяет синтезировать механизм поддержания номинального значения t_k в отапливаемом помещении [13].

С другой стороны, учитывая неразрывность струи теплоносителя в системе отопления горячей водой справедливо равенство, например, для точки А, (см. рис.1):

$$G_1 + G_N = G_A, \quad (23)$$

где G_1, G_N – соответственно входящие в точку А расходы горячей воды через регулирующий клапан V_1 и циркуляционный насос N , кг/с; G_A – выходящий из точки А расход горячей воды в тепло-

вую нагрузку R (отапливаемое помещение), кг/с.

Подставляя (22) в (21), имеем управляющую формулу с учетом динамики t_k в отапливаемом помещении:

$$k_n F(t_k - t_n) = \eta \bar{c}_p (G_A - G_N)(t_1 - t_2). \quad (24)$$

Соотношения (22), (24) позволяют управлять теплоснабжением объекта по схеме «умного дома».

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим две возможные модели управления теплоснабжением соответственно на основе выражений (21) и (23).

А. Однопараметрическое управление. В качестве управляющего параметра при регулировании тепловой нагрузки выберем температуру окружающей сре-

ды (наружного воздуха). Предположим, t_n изменилась на величину Δt_n , тогда получим ее значение, равное $t_n + \Delta t_n$. Полагая, что $k_n, F, t_k, \eta, \bar{c}_p, G_N, t_1, t_2$ не подлежат изменению, достаточно изменить значение G_1 на величину ΔG_1 так, чтобы сохранить постоянство t_k . В итоге получим:

$$k_n F(t_k - (t_n + \Delta t_n)) = \eta \bar{c}_p (t_1 - t_2)(G_1 + \Delta G_1), \quad (25)$$

Вычитая из (24) почленно (21), имеем:

$$\Delta G_1 = -\frac{k_n F}{\eta \bar{c}_p (t_1 - t_2)} \cdot \Delta t_n. \quad (26)$$

Проведем схемную реализацию полученной зависимости с учетом переходных процессов (рис.3):

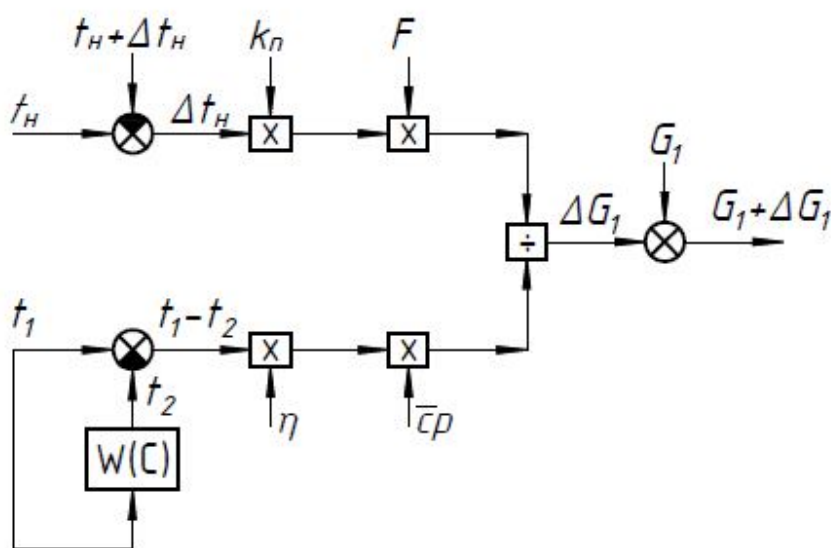


Рис. 3. Структурная схема автоматизации управления зависимой системой теплоснабжения при условии $t_k = \text{const}$

Fig. 3. Block diagram of automation of control of a dependent heat supply system under the condition $t_k = \text{const}$

На основании исследования¹ и соотношения (25) следует, что если $\Delta t_n < 0$, то $\Delta G_1 > 0$ – расход горячей воды возрастает путем приоткрытия клапана V_1 на величину, соответствующую указанной зависимости), в случае, если $\Delta t_n > 0$, то $\Delta G_1 < 0$, аналогично при $\Delta t_n = 0$, то $\Delta G_1 = 0$.

Практика показывает [1, 2], что применение регулировки по каналу $G_1 \div t_A$ обладает существенно меньшей инерционностью во времени по сравнению с каналом управления $G_N \div t_A$ (см. рис. 1).

Б. Двухпараметрическое управление. В этом случае, в качестве управля-

ющих параметров выступают температура окружающей среды (наружного воздуха) t_n и температура воздуха в обогреваемом помещении t_k при обеспечении тепловой нагрузки R .

Рассмотрим случай, когда изменяется не только t_n на величину Δt_n , но и t_k – на величину Δt_k в соотношении (27). В этом случае выражение ΔG_1 при условии постоянства величин $k_n, F, t_k, \eta, \bar{c}_p, G_N, t_1, t_2$, примет вид (рис.4):

$$\Delta G_1 = -\frac{k_n F (\Delta t_k - \Delta t_n)}{\eta \bar{c}_p (t_1 - t_2)}. \quad (27)$$

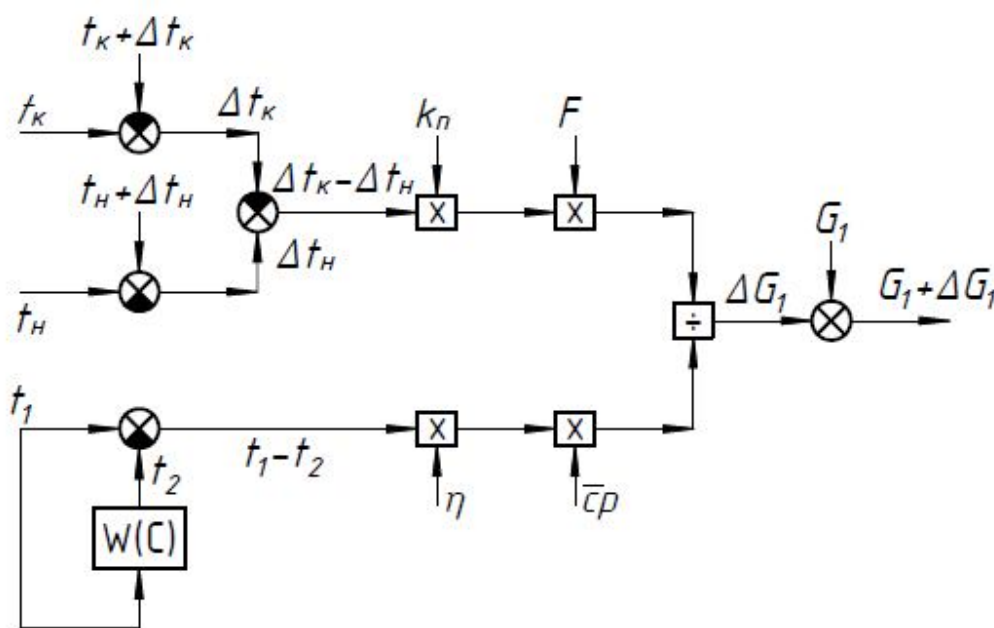


Рис. 4. Структурная схема автоматизации управления зависимой системой теплоснабжения при условии $t_k = \text{const}$ и $t_n = \text{const}$

Fig. 4. Block diagram of automation of control of a dependent heat supply system under the condition $t_k = \text{const}$ and $t_n = \text{const}$

¹ Федоров С. С. Управление системой многоконтурного теплоснабжения зданий при зависимом подключении к тепловым сетям: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2016. 171 с.

Подобная схема «умного дома» была реализована в лаборатории кафедры инфраструктурных энергетических систем. Сравнительные характеристики потреб-

ления тепловой энергии соответственно до применения новой системы теплоснабжения (2022 год) и после – (2023 год), приведены на рис. 5 и в табл. 1.

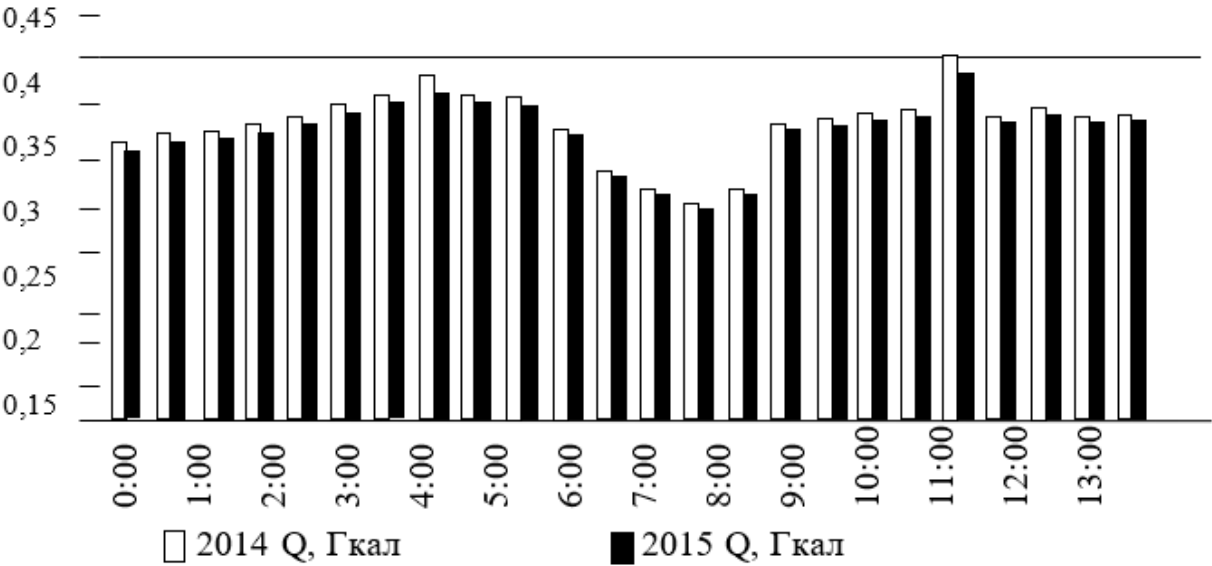


Рис. 5. Диаграмма сравнения потребления тепловой энергии в отопительной системе объекта
Fig. 5. A diagram comparing the consumption of thermal energy in the heating system of the facility

Таблица 1. Сравнительные температурные характеристики 2022 и 2023 гг.

Table 1. Comparative temperature characteristics of 2022 and 2023

№№	Время, час / Time, hour	Температура наружного воздуха, °С / Outdoor air temperature, °С	
		22.11.2022	27.11.2023
1	9.00	–8,4	–8,5
2	12.00	–3,8	–3,3
3	15.00	–1,1	–2,8
4	18.00	–6,2	–5,7
5	21.00	–5,6	–5,9

Проводился сравнительный эксперимент на объекте строительства в период года с похожими температурами t_n наружного воздуха 21.11.2022 г. и 21.11.2023 г. в течение суток. Была получена сравнительная экономия тепловой энергии на 8,84%.

Выводы

В ходе исследования с применением методов математического анализа были получены следующие результаты:
1. Рабочая формула управления процессом теплоснабжения зданий и сооружений для зависимой системы отопления.

2. Проведен анализ и исследование эффективности найденной формулы в сравнении с разными методами теплоснабжения.

3. Учтено влияние переходного процесса.

4. Синтезирована соответствующая схема «умного дома».

5. Проведено сравнительное исследование полученных результатов. Установлен прирост в 8,84% при экономии затрат на тепловую энергию.

Список литературы

1. Математический анализ. Функции нескольких переменных / Д. Н. Тютюнов, Л. И. Студеникина, Е. В. Скрипкина [и др.]. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. 141 с.

2. Тютюнов Д. Н., Бредихина О. А. Марковская продукционная схема и устройство сумматора на основе знакоразрядной симметричной системы счисления. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. 119 с.

3. Математическое описание скоростных методов вычисления функций в задачах теплотехники, термодинамики, термической и химико-термической обработки / Д. Н. Тютюнов, Е. В. Скрипкина, А. А. Шатульский [и др.] // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. 2020. № 2(53). С. 106-112.

4. Тютюнов Д. Н., Бойков А. В., Пшеничных А. О. Модифицированный вариант линейной модели контроля потребления ресурсов в массиве потребителей с возможностью применения знакоразрядных подстановок А.А. Маркова // Математика и ее приложения в современной науке и практике : сборник научных статей IX Международной научно-практической конференции студентов и аспирантов, Курск, 26–27 апреля 2019 г. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 24-30.

5. Выбор аппаратных и программных средств для управления доступом при разработке технологии построения закрытых виртуальных сред органо-вычислительных ресурсов / А.В. Коськин, В.Н.Волков, А.В.Демидов, С.А. Лазарев [и др.] // Информационные системы и технологии. 2015. № 2(88). С.117-123.

6. Коськин А.В., Ужаринский А.Ю. Методика формирования интегрирующей модели данных на основе имеющихся разнородных источников данных // Информационные системы и технологии . 2014. № 2(82). С.19-27.

7. Раков В.И., Захарова О.В. О научной необходимости технологической целесообразности создания новых систем моделирования вычислительных средств управления // Промышленные АСУ и контроллеры. 2013. №2. С. 7-21.

8. Константинов И. С., Федоров С. С. Алгоритм управления системой многоконтурного теплоснабжения зданий и сооружений // Строительство и реконструкция. 2015. № 6(62). С. 107-111.

9. Федоров С. С. Система управления процессом теплоснабжения промышленных предприятий при зависимом присоединении к тепловым сетям // Строительство и реконструкция. 2014. № 5(55). С. 106-110.

10. Исследование зависимости температуры теплоносителя от длины трубопроводов системы отопления / Д. Н. Тютюнов, Н. С. Кобелев, С. С. Федоров [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 3(48). С. 167-171.
11. Распределение тепловой энергии в системе теплоснабжения с позиции энергосбережения / С. С. Федоров, И. Ю. Сидоров, И. П. Труханов [и др.] // Научный альманах. 2015. № 9(11). С. 865-869. <https://doi.org/10.17117/na.2015.09.865>
12. Бурцев А. П., Булгаков А. В., Яковлева В. Н. Вариант управления воздушными потоками по схеме «умный дом» с использованием комплексного многослойного пластинчатого рекуператора // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2023. № 7(1067). С. 60-63.
13. Бурцев А. П., Шлеенко А. В., Тютюнов Д. Н. Исследование математической модели автоматизированного управления тепловыми потоками в системе приточно-вытяжной вентиляции // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2022. № 9(1057). С. 38-41.
14. Version of a mathematical model of purge ventilation system with a complex recuperative heat exchanger / V. Ezhov, N. Semicheva, A. Burtsev [et al.] // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Vol. 19, № 1. P. 246-251. <https://doi.org/10.5937/jaes0-30068>.
15. Математическая модель для автоматизированного управления тепловыми потоками энергоэффективной системы вентиляции / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, Д. Н. Тютюнов, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица, А. П. Бурцев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(1): 38-52. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-38-52>.
16. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
17. Теплотехника / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер [и др.]. 3-е изд., испр. М.: Высшая школа, 2002. 671 с.
18. Тютюнов Д. Н., Бурцев А. П., Бурцев А. П. Использование скоростных методов вычисления функций для практических расчётов в задачах теплотехники и термодинамики // Математика и ее приложения в современной науке и практике: сборник научных статей IX Международной научно-практической конференции студентов и аспирантов, Курск, 26–27 апреля 2019 г. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 65-73.

References

1. Tyutyunov D. N., Studenikina L. I., Skripkina E. V., et al. Mathematical analysis. Functions of several variables. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2021. 141 p. (In Russ.).
2. Tyutyunov D. N., Bredikhina O. A. Markovskaya production scheme and device of an adler based on a signed symmetric number system. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet, 2020. 119 p. (In Russ.).

3. Tyutyunov D. N., Skripkina E. V., Shatul'sky A. A., et al. Mathematical description of high-speed methods for calculating functions in problems of thermal engineering, thermodynamics, thermal and chemical-thermal treatment. *Vestnik RGATA imeni P. A. Solov'eva = Bulletin of the P. A. Solovyov Russian State Technical University*. 2020; (2): 106-112. (In Russ.).

4. Tyutyunov D. N., Boikov A.V., Pshenichnykh A. O. A modified version of a linear model for controlling resource consumption in an array of consumers with the possibility of using digit substitutions A.A. Markov. In: *Matematika i ee prilozheniya v sovremennoi nauke i praktike : sbornik nauchnykh statei IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov i aspirantov = Mathematics and its applications in modern science and practice : collection of scientific articles of the IX International Scientific and Practical Conference of Students and graduate students*. Kursk, Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2019. P. 24-30. (In Russ.).

5. Koskin A.V., Volkov V.N., Demidov A.V., Lazarev S.A., et al. The choice of hardware and software for access control in the development of technology for building closed virtual environments of organo-computing resources. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii = Information Systems and Technologies*. 2015; (2): 117-123. (In Russ.).

6. Koskin A.V., Uzharinsky A.Yu. Methodology for forming an integrating data model based on available heterogeneous data sources. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii = Information Systems and Technologies*. 2014; (2): 19-27. (In Russ.).

7. Rakov V.I., Zakharova O.V. On the scientific necessity of technological expediency of creating new systems for modeling computational controls. *Promyshlennye ASU i kontroly = Industrial Automated Control Systems and Controllers*. 2013; (2): 7-21. (In Russ.).

6. Konstantinov I. S., Fedorov S. S. Algorithm for controlling the system of multi-circuit heat supply of buildings and structures. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya = Building and Reconstruction*. 2015; (6): 107-111. (In Russ.).

9. Fedorov S. S. Heat supply process control system for industrial enterprises with dependent connection to heating networks]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya = Building and Reconstruction*. 2014; (5): 106-110. (In Russ.).

10. Research of the Dependence of Coolant Temperature on the Heating Pipelines Length / Tyutyunov D. N., Kobelev N. S., Fedorov S. S. et al. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2013; (3): 167-171. (In Russ.).

11. Fedorov S. S., Sidorov I. Yu., Trukhanov I. P., et al. Distribution of thermal energy in the heat supply system from the point of view of energy saving. *Nauchnyi al'manakh = Scientific Almanac*. 2015; (9): 865-869. (In Russ.). <https://doi.org/10.17117/na.2015.09.865>.

12. Burtsev A. P., Bulgakov A.V., Yakovleva V. N. Variant of air flow control according to the "smart house" scheme using a complex multilayer plate heat exchanger. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin of construction equipment*. 2023; (7): 60-63. (In Russ.).

13. Burtsev A. P., Shleenko A.V., Tyutyunov D. N. Investigation of the mathematical model of automated control of heat flows in the supply and exhaust ventilation system. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki* = *BST: Bulletin of construction machinery*. 2022: (9): 38-41. (In Russ.).
14. Ezhov V., Semicheva N., Burtsev A. Version of a mathematical model of purge ventilation system with a complex recuperative heat exchanger. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021: (9): 246-251. <https://doi.org/10.5937/jaes0-30068>. (In Russ.).
15. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Tyutyunov D. N., Burtsev A. P., Perepelitsa N. S., Burtsev A. P. A Mathematical Model for Automated Heat Flow Control of an Energy-Efficient Ventilation System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 38-52 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-38-52>. (In Russ.).
16. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow: Energoizdat; 1981. 416 p. (In Russ.).
17. Lukanin V. N., Shatrov M. G., Kamfer G. M., Heat engineering. 3rd ed. Moscow: Vysshaya shkola; 2002. 671 p. (In Russ.).
18. Tyutyunov D. N., Burtsev A. P., Burtsev A. P. The use of high-speed methods of calculating functions for practical calculations in problems of thermal engineering and thermodynamics. In: *Matematika i ee prilozheniya v sovremennoi nauke i praktike: sbornik nauchnykh statei IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov i aspirantov* = *Mathematics and its applications in modern science and practice: collection of scientific articles of the IX International Scientific and Practical Conference of students and post-graduates*. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2019. P. 65-73. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Жилина Кира Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kirazhilina@yandex.ru

Kira V. Zhilina, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Higher Mathematics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kirazhilina@yandex.ru

Тютюнов Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kaf.vm@mail.ru

Dmitrij N. Tyutyunov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Higher Mathematics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kaf.vm@mail.ru

Бурцев Алексей Петрович, кандидат технических наук, преподаватель кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ap_burtsev@mail.ru

Alexey P. Burtsev, Cand. of Sci. (Engineering), Lecturer at the of Infrastructural Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ap_burtsev@mail.ru

УДК 621.865.8

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-71-91>

Программная реализация иерархического подхода решения обратной задачи кинематики робота– манипулятора

Е. М. Апокин¹, В. А. Хандожко¹ ✉

¹ Брянский государственный технический университет,
бульвар 50 лет Октября, д. 7, г. Брянск 241035, Российская Федерация

✉ e-mail: vichandozhko@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Разработка программной реализации иерархического подхода к решению обратной задачи кинематики робота-манипулятора с произвольным количеством сочленений. Разработанная библиотека может быть использована как в составе САПР машиностроительного назначения с поддержкой функционала инженерного анализа (CAE), так и для разработки программного обеспечения встроенных систем управления многокоординатными манипуляционными машинами.

Методы. Идея подхода заключается в итерационном приближении обобщенных координат в последовательности, определенной разработчиком. Количество необходимых итераций определяется требуемой точностью решения. В качестве исходных данных для решения обратной задачи кинематики требуется «матрица манипулятора» 4×4 в символьном виде, начальные значения обобщенных координат, и «матрица манипулятора» 4×4 , описывающая финальное положение и ориентацию схвата. Для реализации выбран язык программирования Си стандарта ANSI C, поскольку он обеспечивает достаточную портативность и близость к аппаратуре.

Результаты. Результатом работы является библиотека языка программирования Си для ЭВМ под управлением операционных систем семейства Unix (например, GNU/Linux, FreeBSD, openBSD, macOS, Solaris), которая предоставляет функции, необходимые для решения обратной задачи кинематики робота–манипулятора.

Заключение. В статье показан пример использования данной библиотеки для трехзвенного робота–манипулятора, а также построена траектория его движения по десяти точкам. Использование предложенной в статье библиотеки libreRGM3 может быть эффективным способом решения ОЗК при моделировании движения робота в САПР (например, OpenSCAD [8]), в учебных или исследовательских целях, в условиях работы с ЭВМ без графического интерфейса или с программируемым логическим контроллером и микроконтроллером.

Ключевые слова: робот; иерархический подход; программа; алгоритм; UNIX.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Апокин Е. М., Хандожко В. А. Среднегодовые температуры воды в тепловых сетях криолитозоны Программная реализация иерархического подхода решения обратной задачи кинематики робота-манипулятора // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №2. С. 71-91. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-71-91>.

Поступила в редакцию 21.02.2024

Подписана в печать 17.04.2024

Опубликована 25.06.2024

Software implementation of a hierarchical approach to solving the inverse problem of kinematics of a robot manipulator

Elisey M. Apokin ¹, Viktor A. Khandozhko ¹ ✉

¹ Bryansk State Technical University,
50 Let Oktyabrya ave. 7, Bryansk 241035, Russian Federation

✉ e-mail: vichandozhko@gmail.com

Abstract

Purpose of research. Development of a software implementation of a hierarchical approach to solving the inverse problem of the kinematics of a robot manipulator with an arbitrary number of joints. The developed library can be used both as part of mechanical engineering CAD systems with support for engineering analysis (CAE) functionality, and for the development of software for embedded control systems for multi-axis handling machines.

Methods. The idea of the approach is to iteratively approximate generalized coordinates in a sequence defined by the developer. The number of required iterations is determined by the required accuracy of the solution. As initial data for solving the inverse kinematics problem, a 4×4 "manipulator matrix" in symbolic form, initial values of generalized coordinates, and a 4×4 "manipulator matrix" describing the final position and orientation of the gripper are required. The ANSI C programming language was chosen for implementation because it provides sufficient portability and proximity to the hardware.

Results. The result of the work is a library of the C programming language for computers running operating systems of the Unix family (for example, GNU/Linux, FreeBSD, openBSD, macOS, Solaris), which provides the functions necessary to solve the inverse problem of the kinematics of a robot manipulator.

Conclusion. The article shows an example of using this library for a three-link robotic manipulator, and also plots the trajectory of its movement along ten points. Using the libreRGM3 library proposed in the article can be an effective way to solve OZK when modeling robot movement in CAD (for example, OpenSCAD [8]), for educational or research purposes, when working with a computer without a graphical interface or with a programmable logic controller and microcontroller.

Keywords: robot; hierarchical approach; program; algorithm; UNIX.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Apokin E. M., Khandozhko V. A. Software implementation of a hierarchical approach to solving the inverse problem of kinematics of a robot manipulator. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(2): 71-91 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2024-28-2-71-91](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-71-91).

Received 21.02.2024

Accepted 17.04.2024

Published 25.06.2024

Введение

Для получения управляющих воздействий для приводов роботов используется решение обратной задачи кинематики (далее по тексту ОЗК) [1]. Данная задача связана с большим количеством сложных расчетов, поэтому для ее решения часто используются ЭВМ.

В настоящее время существует ряд проприетарного программного обеспечения и библиотек, позволяющих решать ОЗК роботов-манипуляторов. Например, Robodk [2], Dyn-Soft RobSim [3], Kuka Load [4], Универсальный механизм [5], Robotics System Toolbox [6] для MatLab и т. д. Стоит отметить свободные программные решения для этой цели, библиотеку OpenRAVE [7] для языка программирования C++ и Robot Operating System [8], представляющую собой операционную систему для решения большого количества задач робототехники. Однако OpenRAVE не поддерживается больше десяти лет, а Robot Operating System, вероятно, является слишком сложным, чтобы быть использованным при решении небольших или узкоспециализированных задач.

В этой работе представлена новая разработка – библиотека языка программирования Си [9], которая позво-

ляет решать обратную задачу кинематики для любых разомкнутых кинематических цепей с произвольным количеством сочленений, поскольку реализует иерархический подход к решению обратной задачи кинематики [10]. Библиотека распространяется под свободной лицензией MIT, что означает, что исходный код программы открыт, все пользователи могут его распространять, вносить в него изменения и делиться своими изменениями. Библиотека использует стандарт ANSI C, стандартную библиотеку языка Си и в функциях ввода-вывода системные вызовы UNIX. То есть, библиотека, скомпилированная из исходного текста, будет работать на любой целевой платформе под управлением операционных системы семейства UNIX, например, GNU/Linux, FreeBSD, openBSD, macOS, Solaris, и при небольших изменениях, на машинах под управлением Windows. В статье представлены краткое описание иерархического подхода к решению ОЗК, документация по функциям, которые предоставляет библиотека, показан пример использования данной библиотеки для трехзвенного робота-манипулятора, а также построена траектория его движения по десяти точкам.

Материалы и методы

Основные положения иерархического подхода включают в себя [10]:

1. Выбор ограниченного набора сочленений, необходимых для выполнения движения.

2. Назначение данным сочленениям последовательности элементарных движений и ограничения этого движения.

3. Приближение последовательным итерационным способом к необходимой точности решения.

Исходное положение исполнительного механизма определяют исходными значениями обобщенных координат $q_0, q_1, \dots, q_n$.

Конечные положения и ориентация схвата робота-манипулятора в системе координат рабочего пространства представлены матрицей преобразования координат ${}^0A_n=T$, иначе – «матрицей манипулятора» [11].

Для решения ОЗК выполняют итерационное приближение к целевым положению и ориентации схвата путем изменения значений обобщенных координат последовательности движения выбранных сочленений [10].

Каждая обобщенная координата изменяется в соответствии с формулой

$$q_i^{(j)} = q_i^{(j-1)} + (-1)^k \cdot \Delta q_i, \quad (1)$$

где $q_i^{(j)}$ и $q_i^{(j-1)}$ – значения обобщенных координат на текущей и предыдущей итерациях соответственно; k – коэффициент, который определяет знак изменения обобщенной координаты; Δq_i – величина приращения обобщенной координаты [10].

Величина приращения Δq_i может назначаться произвольно или рассчитываться формуле

$$\Delta q_i = \frac{s_i}{N} = \frac{q_i^{\max} - q_i^{\min}}{N}, \quad (2)$$

где s_i – величина диапазона изменения обобщенной координаты q_i ; $q_i^{\max}$ и $q_i^{\min}$ – это соответственно максимальное и минимальное отклонение обобщенной координаты q_i ; N – коэффициент, который определяет точность решения [10].

После каждой итерации выполняют ряд проверок:

- влияет ли обобщенная координата на ориентацию схвата или на расстояние от схвата до цели;
- достигнута ли обобщенная координата пределов ее изменения, установленных разработчиком.

При уменьшении расстояния до цели или приближении ориентации схвата к заданному положению корректировка не требуется. Итерационный процесс для текущей обобщенной координаты продолжается.

При удалении обобщенной координаты от цели либо увеличении углового отклонения от заданного положения, знак приращения этой координаты изменяют на противоположный.

При достижении предельных значений обобщенной координаты соответствующее ей приращение также меняет свой знак.

При сохранении удаления от заданной координаты после изменения знака приращения последнего изменение обобщенной координаты отменяют и пере-

ходят к следующей обобщенной координате.

Каждому из $q_0, q_1, \dots, q_n$ сочленений, отвечающих за решение, разработчик назначает определенную функцию в реализации заданного движения [10]. Например, одно сочленение может отвечать за поворот к заданной позиции, два других – за сближение с заданной позицией, сочленения, находящиеся ближе к схвату – за ориентацию схвата и т. д.

При решении ОЗК функции сочленений необходимо учитывать в процессе проверки соответствующих обобщенных координат [12]. Так, если сочленение участвует только в сближении с целью, то для него проверяют изменение расстояния от схвата до заданной позиции. Если функция сочленения связана с ориентацией схвата – для него проверяют угловые отклонения ортов системы координат схвата от осей системы координат рабочего пространства или других осей, выбранных разработчиком. Если функция сочленения связана с положением и ориентацией, то проводят обе вышеописанные проверки.

Когда решение состоит из последовательности движений, то вычислительный процесс сводится к ряд последовательно выполняемых циклических действий. Решение завершается при условии достижения необходимой точности положения и ориентации схвата.

В состав заголовочного файла `rgm3_reverse_kinematic` входят следующие группы функций.

1. Функции для определения величины приращения обобщенной координаты.

Функция `set_iteration_step` вычисляет величину приращения по формуле (2) и возвращает величину приращения для обобщенной координаты q_i .

Функция `set_simple_iteration_step` позволяет в качестве величины диапазона изменения обобщенных координат задать произвольное число.

Вычисляется величина приращения по данной формуле:

$$\Delta q_i = \frac{\Delta_i}{N},$$

где Δ_i – произвольный диапазон. Функция возвращает величину приращения для обобщенной координаты q_i .

2. Функции для итерационного приближения к требуемым позиции и ориентации.

Функция `do_iter_step_position` производит итерацию обобщенной координаты с приближением к целевой позиции.

Обобщенная координата изменяется в соответствии с формулой (1).

В случае, если приблизить схват манипулятора к целевой позиции удалось, функция возвращает новое значение итерируемой обобщенной координаты $q_i^{(j)}$. В противном случае, функция возвращает старое значение обобщенной координаты $q_i^{(j-1)}$, т. е. такое же, какое ей было передано.

Функция `do_iter_step_orientation` идентична предыдущей за исключением того, что она производит приближение для сочленений, которые отвечают

за ориентацию схвата, а не за сближение с целевым положением.

3. Функции для проверки достижения обобщенной координатой пределов ее изменения.

Библиотека предоставляет несколько функций для обработки ситуаций, в которых обобщенная координата q_i принимает недопустимое значение, а именно, превышает предел изменения, установленный разработчиком.

Функция `is_limit_reached` позволяет детектировать этот случай. Функция возвращает 1 в случае $q_i > q_i^{max}$ or $q_i < q_i^{min}$ и возвращает 0 в случае $q_i < q_i^{max}$ or $q_i > q_i^{min}$.

Следующие функции стоит использовать в связке с функцией `is_limit_reached`.

Функция `avoid_position_limiter` возвращает новое значение обобщенной координаты q_i , при котором схват манипулятора принимает наиболее удаленное положение от целевого.

Функция возвращает одно из следующих значений: q_i^{min} , $q_i^{average} = \frac{q_i^{max} + q_i^{min}}{2}$, q_i^{max} при котором схват манипулятора окажется в наиболее удаленном положении от целевого.

Функция `avoid_orientation_limiter` аналогична `avoid_position_limiter`, за исключением того, что возвращает положение, наиболее удаленное по ориентации, а не по позиции. При этом, проверяются угловые отклонения между осями X и X' , Y и Y' , Z и Z' , где $OXYZ$ – система координат схвата в базовой системе координат, при значениях обоб-

щенных координат $q_0, q_1, \dots, q_n$ переданных в функцию; а $OX'Y'Z'$ – система координат схвата в базовой системе координат, при новых значениях обобщенных координат.

4. Функции для диагностики итерационного приближения.

Библиотека предоставляет несколько функций для диагностики итерационного приближения. Диагностика требуется для расчетов ошибки по позиционированию и ориентации, а также для получения соответствующих матриц.

Ниже описаны три функции, которые используются для получения «матрицы манипулятора» и диагностических матриц.

Функция `get_tcp_matrix` возвращает «матрицу манипулятора» при текущих значениях обобщенных координат $q_0, q_1, \dots, q_n$.

Функция возвращает указатель на одномерный динамический массив на 16 элементов типа `double`, который содержит «матрицу манипулятора» в численном виде при текущих значениях обобщенных координат $q_0, q_1, \dots, q_n$.

Функция `get_absolute_error_matrix` используется для получения матрицы абсолютных ошибок.

Функция возвращает указатель на одномерный динамический массив на 16 элементов типа `double`, который содержит матрицу абсолютных ошибок по позиционированию и ориентации.

Абсолютная ошибка вычисляется по формулам:

$$\Delta r_u = r_u^{final} - r_u^{(j)};$$

$$\Delta \gamma_{uw} = \gamma_{uw}^{final} - \gamma_{uw}^{(i)}$$

где $\vec{r}$ – радиус-вектор, проведенный из начала базовой системы координат в начало системы координат схвата; γ – отклонение между соответствующими осями базовой системы координат и системы координат схвата (может выражаться в разности как и между косинусами углов, так и между углами); индексы u и w – соответствуют перечислениям осей базовой системы координат и системы координат схвата.

Возвращаемая матрица имеет вид

$$\begin{pmatrix} \Delta \gamma_{xx} & \Delta \gamma_{xy} & \Delta \gamma_{xz} & \Delta r_x \\ \Delta \gamma_{yx} & \Delta \gamma_{yy} & \Delta \gamma_{yz} & \Delta r_y \\ \Delta \gamma_{zx} & \Delta \gamma_{zy} & \Delta \gamma_{zz} & \Delta r_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Функция `get_relative_error_matrix` используется для получения матрицы относительных ошибок, представленных в процентах.

Относительная ошибка вычисляется по формулам:

$$\Delta \% r_u = \frac{r_u^{final} - r_u^{(j)}}{r_u^{final}} \cdot 100\%,$$

$$\Delta \% \gamma_{uw} = \frac{\gamma_{uw}^{final} - \gamma_{uw}^{(i)}}{\gamma_{uw}^{final}} \cdot 100\%.$$

Возвращаемая матрица имеет вид

$$\begin{pmatrix} \Delta \% \gamma_{xx} & \Delta \% \gamma_{xy} & \Delta \% \gamma_{xz} & \Delta \% r_x \\ \Delta \% \gamma_{yx} & \Delta \% \gamma_{yy} & \Delta \% \gamma_{yz} & \Delta \% r_y \\ \Delta \% \gamma_{zx} & \Delta \% \gamma_{zy} & \Delta \% \gamma_{zz} & \Delta \% r_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Следующая функция окажется полезной, если ошибку по ориентации следует искать не как разность косину-

сов $\cos(\alpha) - \cos(\beta)$, а как разность углов $\alpha - \beta$.

Функция `convert_tcp_matrix_cos2rad` преобразует направляющие косинусы «матрицы манипулятора» в углы поворота между соответствующими осями, выраженные в радианах, и возвращает указатель на новый, измененный, динамический массив, который содержит «матрицу манипулятора», идентичную той, что была ему передана в качестве аргумента, с матрицей поворота, выраженной в углах поворота (радианы), а не направляющих косинусах.

Функция `get_max_error_of_position` возвращает значение максимальной ошибки по позиционированию. Ошибка берется из диагностической матрицы, указатель на которую передается в функцию. Соответственно, ошибка может быть выражена в абсолютных или относительных величинах, в зависимости от того, возвращенное значение какой функции ей передано `get_absolute_error_matrix` или `get_relative_error_matrix`.

Функция `get_average_error_of_position` отличается от предыдущей тем, что возвращает значение средней ошибки по позиционированию.

Функции `get_max_error_of_orientation` и `get_average_error_of_orientation` возвращают значения максимальной и средней ошибки по ориентации соответственно.

В состав заголовочного файла `rgm3_output` входят следующие функции для получения информации от программы.

1. Функции для вывода информации в стандартный поток.

С помощью функции `term_print_matrix` осуществляется вывод в стандартный поток матриц произвольной размерности.

Функция `term_print_error` выводит в стандартный поток значение максимальных и средних ошибок по ориентации и позиционированию.

Функция `term_print_gen_coord` выводит в стандартный поток номер итерации и значения обобщенных координат $q_0^{(j)}, q_1^{(j)}, \dots, q_n^{(j)}$ на данной итерации.

2. В состав этого же заголовочного файла входят следующие функции для записи в файл.

Данные функции позволяют записать информацию в файл формата csv (comma-separated values). Файлы данного типа удобно обрабатывать электронными таблицами, например, LibreOffice [13], OnlyOffice [14] или Microsoft Excel [15].

Их следует применять последовательно.

а. Функция `csv_init_file` создает файл в соответствующей директории с соответствующим именем, и открывает связанный с ним поток ввода.

б. Функция `csv_create_field` создает поле (строку) таблицы, в которую следует заносить соответствующую информацию.

в. Функция `csv_put_info` записывает информацию в необходимое поле (строку) таблицы.

г. Функция `csv_write_file` записывает информацию с оперативной памяти компьютера в постоянное запомина-

ющее устройство, т. е. записывает таблицу в файл.

е. Функция `csv_close_file` закрывает поток ввода–вывода, который ей передан в аргументе.

Результаты и их обсуждение

В качестве объекта исследования выберем манипулятор, кинематическая схема которого представлена на рис. 1.

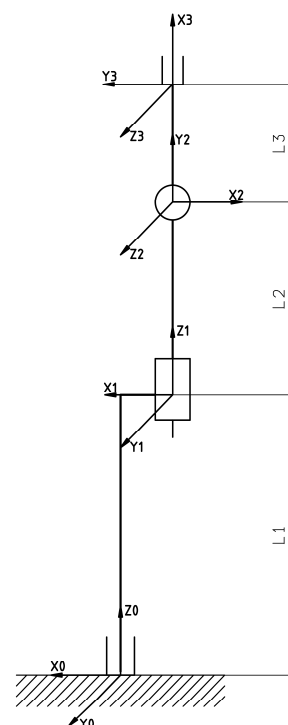


Рис. 1. Кинематическая схема робота–манипулятора

Fig. 1. Kinematic diagram of a robot manipulator

Зададим для робота–манипулятора длины звеньев L_1, L_2, L_3 и укажем их значения (табл. 1, 2).

Как было отмечено в [11], метод Денавита–Хартенберга (ДХ) позволяет сократить количество координат, однозначно определяющих тело (систему координат) в пространстве, с шести до четырех.

Таблица 1. Длины звеньев**Table 1.** Link lengths

L_1 , мм	L_2 , мм	L_3 , мм
600	500	250

Таблица 2. ДХ-параметры робота-манипулятора**Table 2.** DX-parameters of the robot manipulator

Сочленение i / Joint i	a_i , мм / a_i , mm	α_i , рад / α_i , rad	d_i , мм / d_i , mm	θ_i , рад / θ_i , rad
0	0	0	L_1	θ_0
1	0	$\frac{\pi}{2}$	$L_2 + d_1$	π
2	L_3	0	0	$\theta_2 + \frac{\pi}{2}$

Согласно математическому аппарату, сформируем матрицу манипулятора. Вычисления будем производить в си-

стеме символьных вычислений Maxima [16]. В итоге имеем

$${}^0A_3 = T = \begin{pmatrix} \cos\theta_0 \sin\theta_2 & \cos\theta_0 \cos\theta_2 & -\sin\theta_0 & 25\cos\theta_0 \sin\theta_2 \\ \sin\theta_0 \sin\theta_2 & \sin\theta_0 \cos\theta_2 & \cos\theta_0 & 25\sin\theta_0 \sin\theta_2 \\ \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 25\cos\theta_2 + d_1 + L_1 + L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Пусть манипулятор занимает положение, представленное на рис. 2. Также зададим ограничения изменений обоб-

щенных координат. Отразим эту информацию в табл. 3.

Таблица 3. Начальные значения и ограничения изменения обобщенных координат**Table 3.** Initial values and limitations of changes in generalized coordinates

Сочленение i / Joint i	q_i^{min}	q_i	q_i^{max}
0	-2π , рад	0, рад	2π , рад
1	-300, мм	0, мм	300, мм
2	$-\frac{5\pi}{6}$, рад	$\frac{\pi}{4}$, рад	$\frac{5\pi}{6}$, рад

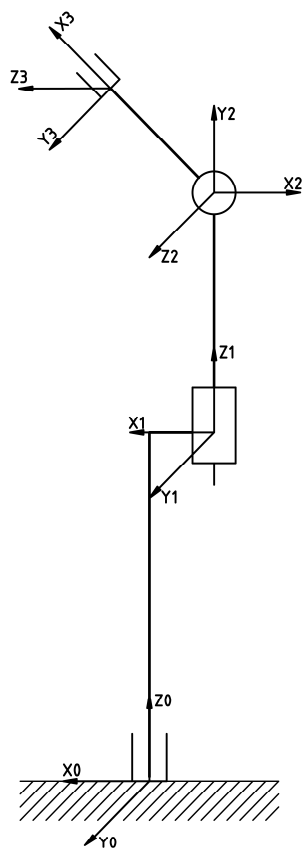


Рис. 2. Исходное положение робота–манипулятора

Fig. 2. The initial position of the robot arm

Необходимо выбрать сочленения для движения. В данном случае это все сочленения манипулятора. Сочленение q_0 отвечает за поворот манипулятора относительно стойки на первом этапе решения, сочленение q_2 – за достижение требуемой ориентации схвата, сочленение q_1 будет отвечать за достижение требуемой позиции на последнем этапе решения.

$$q_0 \mapsto q_2 \mapsto q_1.$$

Таким образом, имеем три сочленения, для которых необходимо решить ОЗК.

Пусть траектория движения схвата манипулятора (далее *TCP* – *Tool Center Point*) будет прямая. Зададим

прямую в базовой системе координат $OX_0Y_0Z_0$. Для задания прямой воспользуемся уравнением прямой в пространстве, проходящей через две точки.

$$\frac{x-x_0}{x_1-x_0} = \frac{y-y_0}{y_1-y_0} = \frac{z-z_0}{z_1-z_0}.$$

Зададим произвольные крайние точки прямой в рабочем пространстве робота. Пусть $P_0 = (250, 0, 1100)$ и $P_1 = (25, 225, 920)$. В таком случае получим

$$\frac{250-x}{5} = \frac{y}{5} = \frac{1100-z}{4}.$$

Разобьем траекторию (прямую) на десять промежутков, и для каждой точки найдем координаты в системе $OX_0Y_0Z_0$. Чтобы получить десять точек, будем изменять $z = 1100 \dots 920$ с шагом $\Delta z = 20$ (табл. 4).

При построении траектории нас не интересует ориентация схвата, так как положение схвата манипулятора в каждом положении определяется только координатами ТСП в базовой системе координат.

Для использования библиотеки необходимо описать функции с прототипом `double()(const double*)`, которые будут содержать решение обратной задачи кинематики для каждого элемента матрицы манипулятора в символьном виде. Адреса этих функций передаются в массив. Таким образом, получаем матрицу манипулятора в символьном виде.

Также следует описать начальные значения обобщенных координат, пределы их изменения и коэффициент точности решения.

Таблица 4. Траектория движения TCP**Table 4.** TCP trajectory

№	x	y	x
0	250	0	1100
1	225	25	1080
2	200	50	1060
3	175	75	1040
4	150	100	1020
5	125	125	1000
6	100	150	980
7	75	175	960
8	50	200	940
9	25	225	920

Матрица манипулятора целевого положения схвата манипулятора будет задаваться для удобства с помощью аргументов командной строки. При этом подматрицу поворота можно задать нулевой, поскольку все положения траектории задаются только координатами TCP в базовой системе координат.

После чего, в теле главной функции описываем алгоритм решения ОЗК $q_0 \mapsto q_2 \mapsto q_1$. Решение будем производить до тех пор, пока максимальное значение абсолютной ошибки по позиционированию больше 0.01 мм. При этом после последовательного итерирования всех сочленений итерация будет продолжаться с начала алгоритма, но с увеличенным на 25% коэффициентом точности решения по сравнению с предыдущей итерацией.

Вывод информации организован следующим образом. По завершению

решения ОЗК в стандартный поток выводят значения обобщенных координат, порядковый номер последней итерации и абсолютные максимальную и среднюю ошибки по позиционированию. В файл будем заносить такую же информацию каждый итерационный шаг.

Блок-схема алгоритма решения ОЗК данного робота-манипулятора представлена на рис. 3.

Результаты решения ОЗК для каждого положения траектории представлены в табл. 5 где № – это номер положения, соответствующий такому же номеру в табл. 4; q_0, q_1, q_2 – значения обобщенных координат для каждого положения; q_{err}^{max} – максимальная ошибка по позиционированию; q_{err}^{aver} – средняя ошибка по позиционированию; $iter$ – количество итераций, понадобившихся для решения ОЗК; $time$ – время, затраченное на полное решение ОЗК.

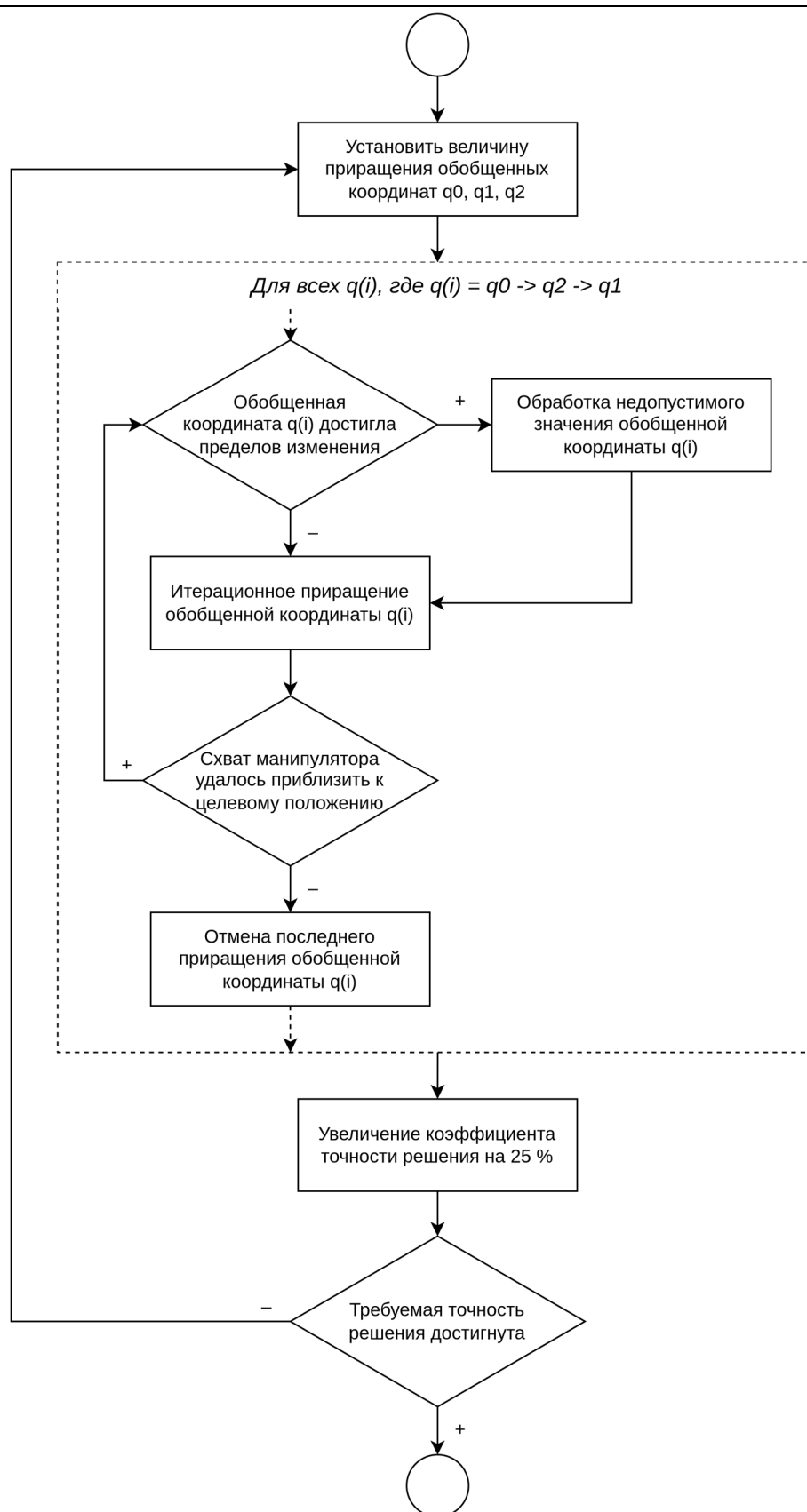


Рис. 3. Блок-схема алгоритма решения ОЗК

Fig. 3. Block diagram of the UGC solution algorithm

Таблица 5. Значение обобщенных координат, точность и скорость решения**Table 5.** The value of generalized coordinates, accuracy and speed of the solution

№	q_0 , рад / q_0 , rad	q_1 , мм / q_1 , mm	q_2 , рад / q_2 , rad	q_{err}^{max} , мм / q_{err}^{max} , mm	q_{err}^{aver} , мм / q_{err}^{aver} , mm	<i>iter</i>	<i>time</i> , с / <i>time</i> , s
0	0.0000	0.0000	1.5708	0.0000	0.0000	30	0.001
1	0.1107	86.0446	2.0089	0.0100	0.0037	8293	0.003
2	0.2450	101.4052	2.1720	0.0090	0.0061	635	0.001
3	0.4050	102.0207	2.2759	0.0100	0.0063	510	0.001
4	0.5881	93.2071	2.3362	0.0080	0.0050	518	0.001
5	0.7854	76.7877	2.3562	0.0091	0.0047	519	0.001
6	0.9827	53.2077	2.3362	0.0082	0.0053	497	0.001
7	1.1660	22.0181	2.2758	0.0094	0.0063	485	0.001
8	1.3258	-18.5746	2.1721	0.0067	0.0052	503	0.001
9	1.4601	-73.9166	2.0090	0.0089	0.0040	560	0.001

Исходя из данных в табл. 5 можно сделать вывод, что все значения обобщенных координат лежат внутри ограничений, приведенных в табл. 3.

Из табл. 5 видно, что полное решение ОЗК трехзвенного робота-манипулятора занимает тысячные доли секунды. Измерение проводилось с помощью утилиты «time», поставляемой в составе многих дистрибутивов ОС GNU/Linux. ЭВМ, на которой производилось вычисление, оснащена ОС Debian 12 GNU/Linux [17], ЦП AMD Ryzen 5 5600H и ОЗУ объемом 15330 МБ. Программа компилировалась посредством компилятора gcc 12.2.0 с использованием реализации стандартной библиотеки glibc 2.36.

Время в значительной степени зависит от алгоритма решения ОЗК и

сложности решения прямой задачи кинематики конкретного робота, а также от случайных параметров, например, очереди программы на исполнение центральным процессором [18]. Чтобы снизить влияние случайных факторов на время выполнения программы, из нее были убраны операции вывода информации в стандартный поток и записи в файл [18]. Точность измерения времени обусловлена аппаратными возможностями ЭВМ [18].

Для наглядности работы программы экспортируем для положения №2 значения обобщенных координат, и максимальной и средней ошибки по позиционированию на каждом шаге итерации в csv-файл. Воспользовавшись пакетом электронных таблиц в составе

ПО LibreOffice [13], построим их графики (рис. 4 – 8).

На графиках изменения обобщенных координат q_i во время процесса итерирования (рис. 4 – 6) вертикальны-

ми линиями обозначены итерации, на которых ошибка итерирования между текущим итерационным значением и финальным устойчиво достигла 10%, 5%, 1% и 0.5% соответственно.

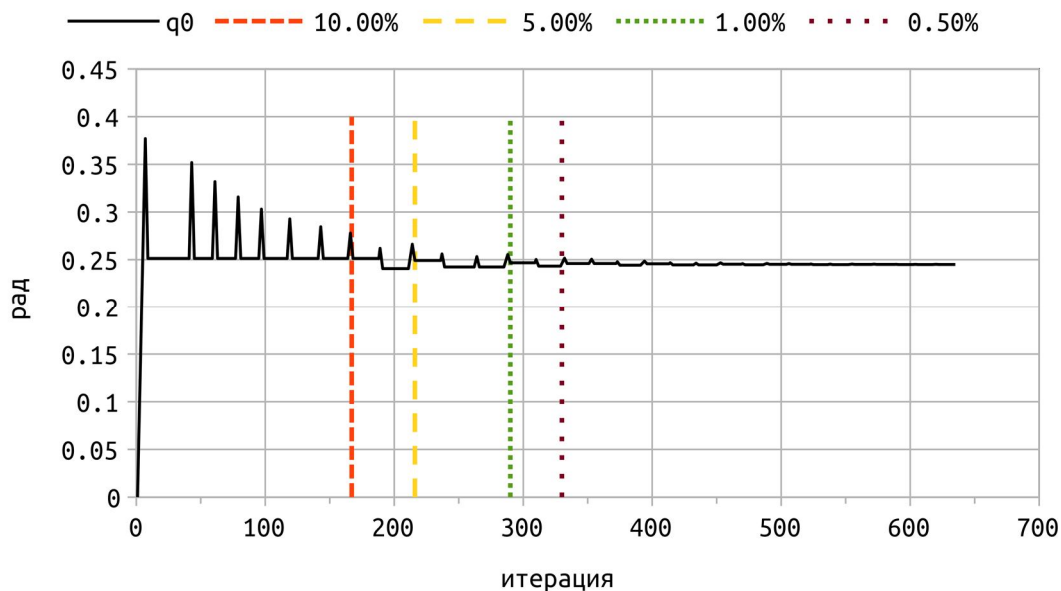


Рис. 4. Процесс итерирования обобщенной координаты q_0

Fig. 4. The process of iterating a generalized coordinate q_0

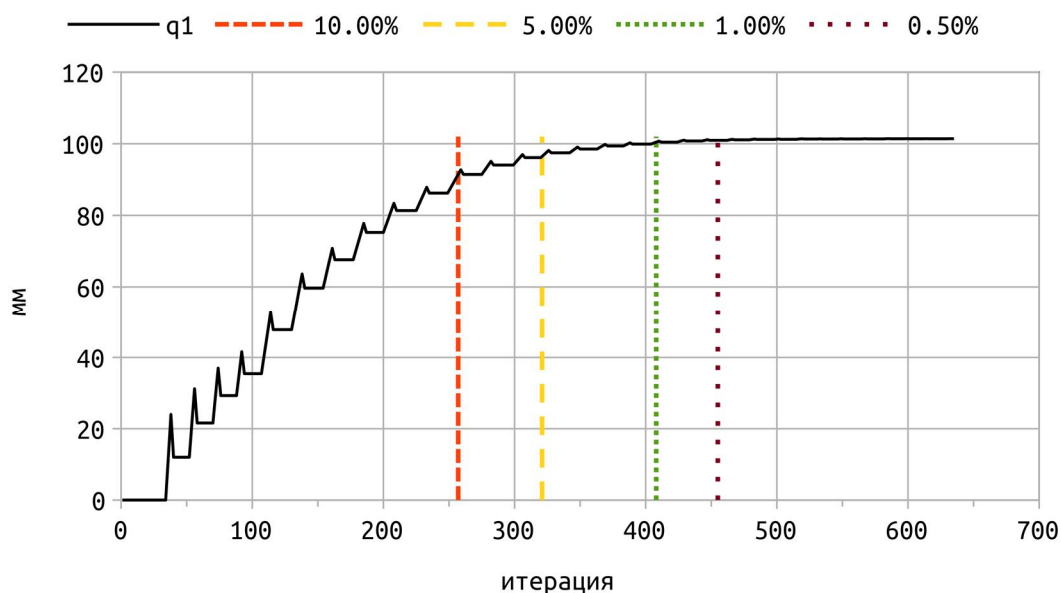


Рис. 5. Процесс итерирования обобщенной координаты q_1

Fig. 5. The process of iterating a generalized coordinate q_1

На рис. 4 представлено изменение значения обобщенной координаты q_0 в процессе приближения к целевому положению №2 из табл. 4. Исходя из графика можно сделать вывод, что обобщенная координата вращательного звена, отвечающего за поворот робота относительно стойки, принимает удовлетворительные значения в пределах 350 итераций для данного положения.

Анализируя график, представленный на рис. 5, можно сделать заключение, что обобщенная координата поступательного звена, отвечающего за достижение требуемой позиции схвата, принимает удовлетворительные значения в пределах 550 итераций для данного положения.

График, представленный на рис. 6, демонстрирует изменение обобщенной координаты вращательного сочленения, отвечающего за достижение требуемой

позиции схвата в процессе итерирования. Исходя из графика, можно сделать вывод, что обобщенная координата q_2 принимает удовлетворительные значения в области 350 итераций.

«Пики» на графиках изменения значения обобщенных координат (см. рис. 4 – 6) обусловлены тем, что реализация функций приближения к целевому положению из заголовочного файла `rgm3_reverse_kinematic` начинает производить итерацию с положительным знаком приращения, и только в случае, если схват приблизить не удалось, меняет знак приращения на противоположный.

На рис. 7. представлено изменение значения максимальной ошибки по позиционированию схвата в процессе итерирования. Из графика видно, что максимальная ошибка принимает значение меньше 1 мм в области 400 итераций.

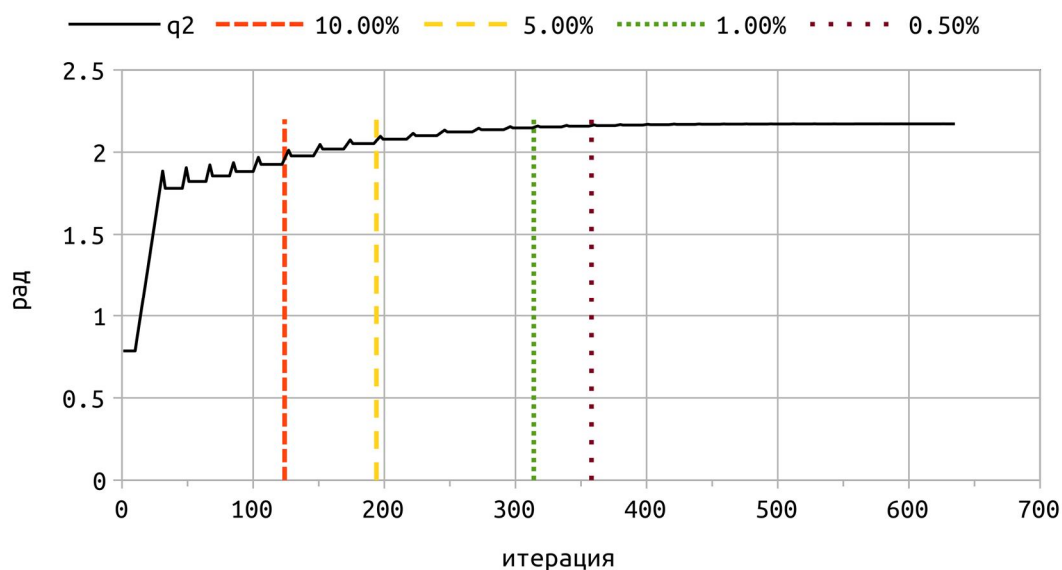


Рис. 6. Процесс итерирования обобщенной координаты q_2

Fig. 6. The process of iterating a generalized coordinate q_2

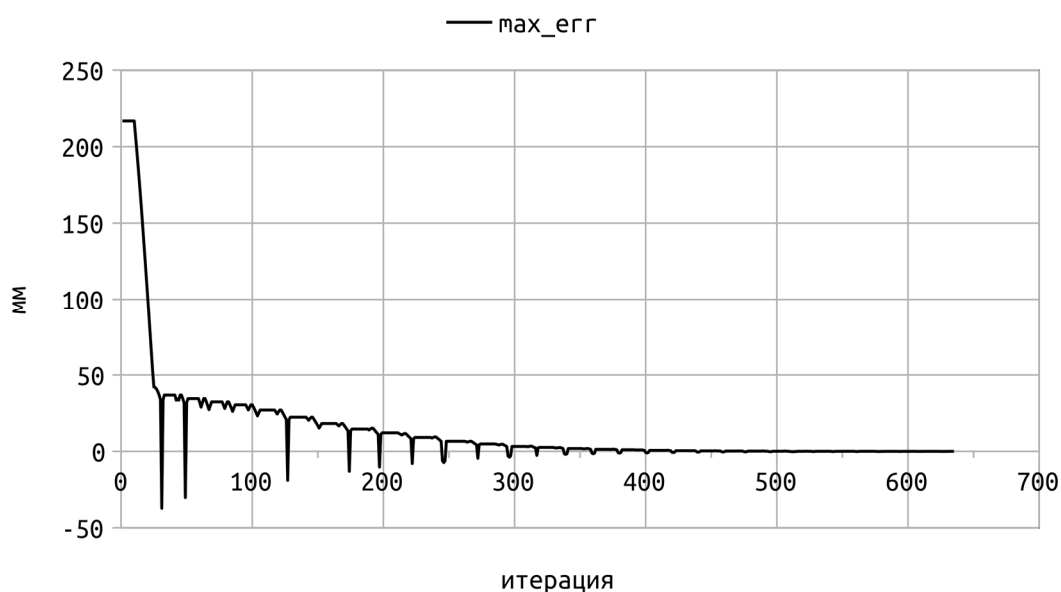


Рис. 7. Изменение значения максимальной ошибки по позиционированию в процессе итерирования

Fig. 7. Changing the value of the maximum positioning error during iteration

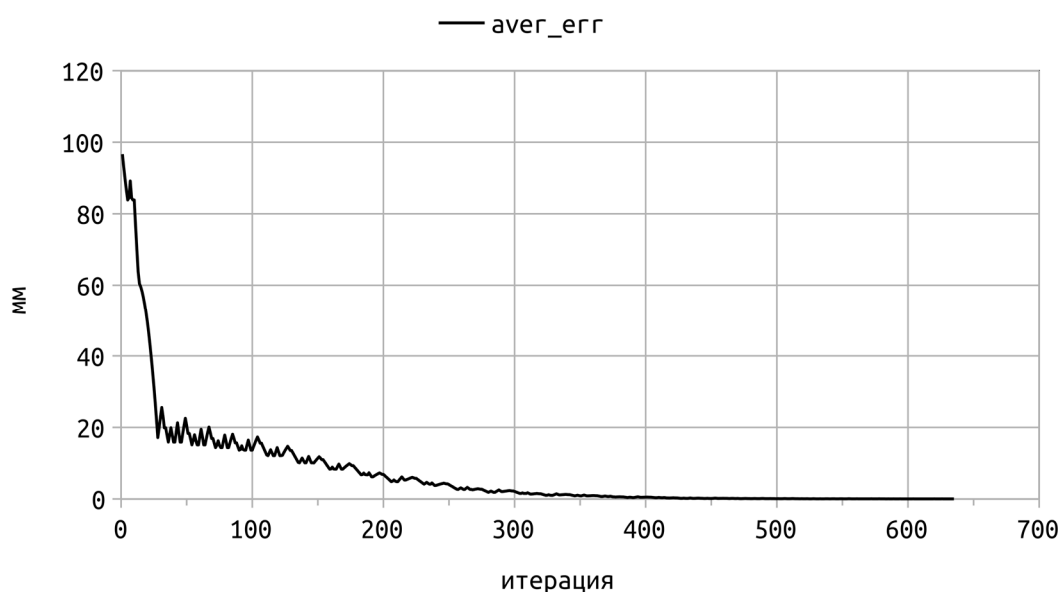


Рис. 8. Изменение значения средней ошибки по позиционированию в процессе итерирования

Fig. 8. Changing the value of the average positioning error in the iteration process

Изменение значения средней ошибки по позиционированию схвата в процессе итерирования представлено на рис. 8. По графику можно сказать, что

средняя ошибка принимает значение меньше 1 мм в области 350 итераций.

«Пики» и «волны» на графиках изменения максимальной и средней ошиб-

ки позиционирования (см. рис. 7, 8) обусловлены тем, что приближение производится последовательно $q_0 \mapsto q_2 \mapsto q_1$, следовательно, изменение одной обобщенной координаты требует корректировки другой.

Воспользовавшись САПР OpenSCAD [16], визуализируем модель и траекторию робота (рис. 9). Объединение нескольких изображений в одно произведено с помощью редактора изображений GIMP [17].

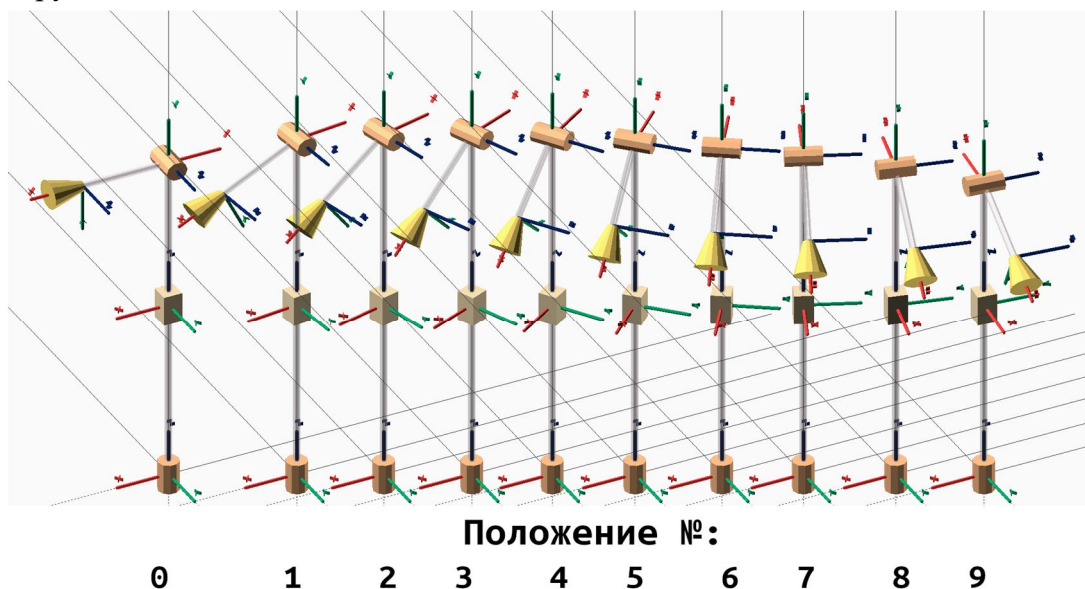


Рис. 9. Визуализация траектории робота

Fig. 9. Visualizing the trajectory of the robot

Выводы

Назовем предложенную в данной статье программную реализацию иерархического подхода к решению ОЗК робота-манипулятора с произвольным количеством сочленений libreRGM3.

libreRGM3 предоставляет функции для определения приращения обобщенной координаты, итерационного приближения к целевым положению и ориентации, избегания пределов изменения обобщенной координаты, диагностики итерационного приближения, а также функции для вывода информации в стандартный поток и записи информа-

ции в файл типа csv (comma-separated values).

Работа библиотеки проверена на ЭВМ под управлением операционной системы Debian 12 [17]. Программа, написанная в статье с использованием данной библиотеки, продемонстрировала сходимость за малое количество итераций и быструю скорость решения.

Часть преимуществ и недостатков решения ОЗК посредством написания рабочей программы с использованием библиотеки, представленной в статье, относится к методу решения, который она реализует, другая часть – непосредственно к реализации.

Преимуществами иерархического подхода является однозначность решения, отсутствие необходимости дополнительных проверок полученного решения, отсутствие необходимости дополнительного обучения модели перед решением, общность способа [10].

Недостатками иерархического подхода являются необходимость решения прямой задачи кинематики на каждом шаге итерации, а также то, что алгоритм решения ОЗК и коррекции величин приращения обобщенных координат возлагаются на разработчика [10].

Преимуществами реализации является то, что она не накладывает ограничения на количество сочленений исследуемого манипулятора, число требуемых итераций, а также предлагает ряд функций, которые выходят за рамки иерархического подхода, но могут быть полезны при написании рабочей программы. Например, функции для вывода информации в стандартный поток или записи в файл, функции для обработки ситуаций, когда обобщенная координата принимает недопустимое значение. Помимо этого, реализация иерархического подхода, предложенная в статье, имеет полную документацию, не использует внешних зависимостей и не зависит от конкретного компилятора или реализации стандартной библиоте-

ки, является переносимой между UNIX-подобными ОС, распространяется свободно под лицензией MIT.

Недостатками реализации являются скромность функционала по сравнению с другими проектами [2-8], отсутствие полной поддержки ЭВМ под управлением не-UNIX-подобных ОС (например, семейства Windows) или работающих без ОС, отсутствие собранных бинарных пакетов (распространяется только в виде исходного кода для дальнейшей компиляции).

В данный момент автор работает над устранением существующих недостатков.

Таким образом, использование предложенной в статье библиотеки libreRGM3 может быть эффективным способом решения ОЗК при моделировании движения робота в САПР (например, OpenSCAD [19, 20]), в учебных или исследовательских целях, в условиях работы с ЭВМ без графического интерфейса или с программируемым логическим контроллером и микроконтроллером.

Исходный текст библиотеки доступен для скачивания, использования и изучения по ссылке <https://codeberg.org/UlyssesApokin/libreRGM3/releases>. Актуальная и подробная документация по функциям библиотеки доступна по ссылке <https://codeberg.org/UlyssesApokin/libreRGM3/wiki>.

Список литературы

1. Борисов О. И., Громов В. С., Пыркин А. А. Методы управления робототехническими приложениями. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 108 с.

2. Simulate Robot Applications Program any Industrial Robot with One Simulation Environment // RoboDK. URL: <https://robodk.com/> (дата обращения: 08.12.2023).

3. Программный комплекс для моделирования роботов и робототехнических систем // Dyn-Soft RobSim. URL: <http://www.robsim.dynsoft.ru/> (дата обращения: 08.12.2023).

4. Web based free tool to search, compare and immediately analyze particular robots // KUKA Load. URL: <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/software/cloud-software/kuka-load> (дата обращения: 08.12.2023).

5. Универсальный механизм. URL: <http://www.robsim.dynsoft.ru/> (дата обращения: 08.12.2023).

6. Design, simulate, test, and deploy robotics applications // Robotics System Toolbox. URL: <https://www.mathworks.com/products/robotics.html> (дата обращения: 08.12.2023).

7. Latest Official Release: 0.8.2 // Open RAVE. URL: <http://www.openrave.org/> (дата обращения: 08.12.2023).

8. The Robot Operating System (ROS) is a set of software libraries and tools that help you build robot applications // ROS - Robot Operating System. URL: <https://www.ros.org/> (дата обращения: 08.12.2023).

9. Кернинган Б. У., Ритчи Д. М. Язык программирования С. 2-е изд. СПб., 2020. 288 с.

10. Каргинов Л. А. Иерархический подход к решению обратной задачи кинематики // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2016. № 3. С. 37-63.

11. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир, 1989. 624 с.

12. Крахмалев О. Н. Моделирование манипуляционных систем роботов. Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2018. 165 с.

13. LibreOffice is a free and powerful office suite, and a successor to OpenOffice.org (commonly known as OpenOffice). Its clean interface and feature-rich tools help you unleash your creativity and enhance your productivity // LibreOffice. URL: <https://www.libreoffice.org/> (дата обращения: 11.12.2023).

14. Run your private office with the ONLYOFFICE // OnlyOffice. URL: <https://www.onlyoffice.com/> (дата обращения: 11.12.2023).

15. Turn data into insights with free and premium spreadsheets // Microsoft Excel. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/excel> (дата обращения: 11.12.2023).

16. Maxima. A Computer Algebra System // Maxima. URL: <https://maxima.sourceforge.io/> (дата обращения: 13.12.2023).

17. Debian – The Universal Operating System // Debian. URL: <https://www.debian.org/> (дата обращения: 25.12.2023).

18. Столяров А. В. Программирование: введение в профессию. Т.2. Системы и сети. 2-е изд. М.: ДМК Пресс, 2021. 656 с.

19. OpenSCAD: The Programmers Solid 3D CAD Modeller // OpenSCAD. URL: <https://openscad.org/> (дата обращения: 25.12.2023).

20. GIMP – GNU Image Manipulation Program // GIMP. URL: <https://www.gimp.org/> (дата обращения: 25.12.2023).

References

1. Borisov O. I., Gromov V. S., Pyrkin A. A. Methods for controlling robotic applications. Saint Petersburg: Universitet ITMO; 2016. 108 p. (In Russ.).

2. Simulate Robot Applications Program any Industrial Robot with One Simulation Environment. *RoboDK*. Available at: <https://robodk.com/> (accessed 08.12.2023).

3. Software package for modeling robots and robotic systems. *Dyn-Soft RobSim*. Available at: <http://www.robsim.dynsoft.ru/> (accessed 08.12.2023).

4. Web based free tool to search, compare and immediately analyze particular robots. KUKA Load. Available at: <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/software/cloud-software/kuka-load> (accessed 08.12.2023).

5. Universal mechanism. (In Russ.). Available at: <http://www.robsim.dynsoft.ru/> (accessed 08.12.2023).

6. Design, simulate, test, and deploy robotics applications. *Robotics System Toolbox*. Available at: <https://www.mathworks.com/products/robotics.html> (accessed 08.12.2023).

7. Latest Official Release: 0.8.2. *Open RAVE*. Available at: <http://www.openrave.org/> (accessed 08.12.2023).

8. The Robot Operating System (ROS) is a set of software libraries and tools that help you build robot applications. *ROS - Robot Operating System*. Available at: <https://www.ros.org/> (accessed 08.12.2023).

9. Kerningan B. W., Ritchie D. M. Programming language C. 2nd ed. Saint Petersburg: Dialektika; 2020. 288 p. (In Russ.).

10. Karginov L. A. Hierarchical approach to solving the inverse problem of kinematics. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N. E. Bauman = Science and Education. MSTU im. N. E. Bauman*. 2016; (3): 37-63. (In Russ.).

11. Fu K., Gonzalez R., Li K. Robotics. Moscow: Mir; 1989. 624 p. (In Russ.).

12. Krakhmalev O. N. Modeling of manipulation systems of robots. Saratov: IP Er Media; 2018. 165 p. (In Russ.).

13. LibreOffice is a free and powerful office suite, and a successor to OpenOffice.org (commonly known as OpenOffice). Its clean interface and feature-rich tools help you unleash your creativity and enhance your productivity. *LibreOffice*. Available at: <https://www.libreoffice.org/> (accessed 11.12.2023).

14. Run your private office with the ONLYOFFICE. *OnlyOffice*. Available at: <https://www.onlyoffice.com/> (accessed: 11.12.2023).

15. Turn data into insights with free and premium spreadsheets. *Microsoft Excel*. Available at: <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/excel> (accessed 11.12.2023).
16. Maxima. A Computer Algebra System. *Maxima*. Available at: <https://maxima.sourceforge.io/> (accessed 13.12.2023).
17. Debian – The Universal Operating System. *Debian*. Available at: <https://www.debian.org/> (accessed 25.12.2023).
18. Stolyarov A.V. Programming: an introduction to the profession. Vol.2: Sistemy i seti. 2nd ed. Moscow: DMK Press; 2021. 656 p. (In Russ.).
19. OpenSCAD: The Programmers Solid 3D CAD Modeller. *OpenSCAD*. Available at: <https://openscad.org/> (accessed 25.12.2023).
20. GIMP – GNU Image Manipulation Program. *GIMP*. Available at: <https://www.gimp.org/> (accessed 25.12.2023).

Информация об авторах / Information about the Authors

Апокин Елисей Михайлович, студент,
Брянский государственный технический
университет, г. Брянск, Российская Федерация, e-
mail: aoipkn@yandex.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3390-3787>

Elisey M. Apokin, Student, Bryansk State
Technical University, Bryansk, Russian Federation,
e-mail: aoipkn@yandex.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3390-3787>

Хандожко Виктор Александрович, кандидат
технических наук, доцент, заведующий кафедрой
«Автоматизированные технологические
системы», Брянский государственный
технический университет,
г. Брянск, Российская Федерация,
e-mail: vichandozhko@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5212-0616>,

Viktor A. Khandozhko, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor, Head of the
Automated Technological Systems Department,
Bryansk State Technical University,
Bryansk, Russian Federation,
e-mail: vichandozhko@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5212-0616>

УДК 681.5

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-92-113>

Оценка уязвимости протоколов обмена данными БПЛА для обеспечения повышения стабильности работы в нагруженных режимах

С. Г. Черный^{1,3} ✉, Т.В. Зонтова², Н. В. Шапаренко³

¹ Керченский государственный морской технологический университет,
ул. Орджоникидзе, д. 82, г. Керчь 298309, Республика Крым, Российская Федерация

² Черноморское высшее военно-морское училище имени П.С. Нахимова,
ул. Дыбенко, д. 1а, г. Севастополь 299028, Российская Федерация

³ Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова,
ул. Двинская, д. 5/7, г. Санкт-Петербург 198035, Российская Федерация

✉ e-mail: sergiiblack@gmail.com

Резюме

Цель работы. В настоящее время активно растёт интерес к использованию дронов в различных сферах. Причины связаны с непрерывным ростом технологий, с появлением быстрых микропроцессоров, которые обеспечивают автономное управление несколькими системами связи. Мониторинг, строительство, контроль и слежение – лишь некоторые из областей, в которых использование БПЛА становится обычным явлением. Цель работы заключается в изучении работы нагруженности протоколов обмена информации на различных уровнях взаимодействия и предложить варианты повышения надежности взаимодействия на основе гибридных технологий. Задачами исследования является детализация протоколов обмена данными в БПЛА на различных уровнях, с учетом анализа структуры передаваемой информации и гибридной модели.

Методы. В статье рассматриваются протоколы, задействованные в работе БПЛА на разных уровнях, их особенности, преимущества и недостатки, а также их свои восстановление связи. Использование реалистичных технологических особенностей беспилотных летательных аппаратов для тестирования моделей и методов может оказаться весьма актуальным для практических целей в различных отраслях от гражданских до военных.

Результаты. В статье представлена детализация протоколов связи и обмена данными, которые используются в системах БПЛА, а также их производительность.

Заключение. Для качественной оценки влияния на безопасность информации, предлагается ввести гибридные модели компоненты, которые динамически адаптируют протоколы обмена данными на основе анализа угроз в режиме работы в реальном времени и возможностей системы. Рациональное использование энергии имеет решающее значение для осуществления эффективного и безопасного процесса работы БПЛА. Затронуты и рассмотрены вопросы защищенности канала передачи загруженности протокола с позиции затрат энергетических ресурсов.

Ключевые слова: БПЛА; протокол; уязвимость; реальное время; угроза; информационная безопасность; загруженность протоколов.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Черный С. Г., Зонтова Т.В., Шапаренко Н. В. Оценка уязвимости протоколов обмена данными БПЛА для обеспечения повышения стабильности работы в нагруженных режимах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №2. С. 92-113. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-92-113>.

Поступила в редакцию 17.04.2024

Подписана в печать 27.05.2024

Опубликована 25.06.2024

Vulnerability assessment of UAV data exchange protocols to ensure increased stability of operation in loaded modes

Sergey G. Cherny ^{1,3} ✉, Tatyana V. Zontova ², Nikita V. Shaparenko ³

¹ Kerch State Marine Technological University
82 Ordzhonikidze str., Kerch 298309, Republic of Crimea, Russian Federation

² Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov,
1a, Dybenko str., Sevastopol 299028, Russian Federation

³ State University of Marine and River Fleet named after admiral S.O. Makarov
5/7 Dvinskaya str., St. Petersburg 198035, Russian Federation

✉ e-mail: sergiiblack@gmail.com

Abstract

Purpose of research. Currently, interest in the use of drones in various fields is actively growing. The reasons are related to the continuous growth of technology, with the advent of fast microprocessors that provide autonomous control of multiple communication systems. Monitoring, construction, control and surveillance are just some of the areas in which the use of UAVs is becoming commonplace. The purpose of the work is to study the work of loaded information exchange protocols at various levels of interaction and to propose options for increasing the reliability of interaction based on hybrid technologies. The article provides details of the communication and data exchange protocols used in UAV systems, as well as their performance.

Methods. The article discusses the protocols involved in the operation of UAVs at different levels, their features, advantages and disadvantages, as well as their failures to restore communication. Using realistic technological features of unmanned aerial vehicles to test models and methods can be very relevant for practical purposes in various industries from civil to military.

Results. The objectives of the study are to detail the data exchange protocols in UAVs at various levels, taking into account the analysis of the structure of the transmitted information and the hybrid model.

Conclusion. To qualitatively assess the impact on information security, it is proposed to introduce hybrid models of components that dynamically adapt data exchange protocols based on real-time threat analysis and system capabilities. Efficient use of energy is critical to efficient and safe UAV operation. The issues of security of the transmission channel of the protocol load from the point of view of the cost of energy resources are touched upon and considered.

Keywords: UAV; protocol; vulnerability; real time; threat; information security; protocol load.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Cherny S. G., Zontova T. V., Shaparenko N. V. Vulnerability assessment of UAV data exchange protocols to ensure increased stability of operation in loaded modes. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(2): 92-113 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-92-113>.

Received 17.04.2024

Accepted 27.05.2024

Published 25.06.2024

Введение

В наше время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) стали неотъемлемыми инструментами в самых различных областях, начиная от гражданских задач – визуальное наблюдение при помощи в случае ЧП, элементами транспортной логистики, заканчивая военной разведкой и участием в полноценных военных конфликтах [1-3].

В ходе реализации работы использованы самодельные основы БПЛА в качестве материнских плат на основе Raspberry Pi 3 и STMicroelectronics STM32F407 Discovery Board на базе ARM Cortex M4 процессора (STM32F407VGT6). В качестве оболочки для самодельного дрона использовался Ardupilot. Для анализа протоколов передачи информации низкого (логического) уровня использовался осциллограф Hantek DSO-6022BE и логический анализатор ChipDipDac RDC2-0064. При работе с высокими скоростями передачи данных или большим объемом данных возникают некоторые проблемы с записью и декодированием в реальном времени, декодирование зашифрованных каналов связи также занимает время и вычислительные ресурсы, поэтому в своей рабо-

те будет упор на работу логического анализатора.

1. Отображение записанных выборок:

- захваченные данные отображаются на экране в виде временных диаграмм или графиков;

- во время отображения данных анализатор может обнаруживать и декодировать протоколы передачи данных, такие как UART, SPI, I2C, CAN и другие. Это позволяет пользователю анализировать передаваемые данные и последовательность действий между устройствами.

2. Анализ выборок в специализированном ПО (PulseView):

- PulseView – программное обеспечение с открытым исходным кодом для анализа данных, полученных от логических анализаторов. Оно позволяет визуализировать данные, анализировать протоколы и искать аномалии в сигналах;

- непосредственно в PulseView можно настраивать параметры анализа, фильтровать данные, синхронизировать различные каналы сигналов и производить другие операции для более детального анализа данных;

- можно визуально анализировать захваченный трафик, проверять целостность информации, выводить содержи-

мое сообщений захваченных данных, декодировать сообщения протоколов, используя фильтры.

Материалы и методы

Протоколы обмена данными на физическом уровне в БПЛА

В БПЛА различных производителей зачастую используются следующие основные протоколы на логическом уровне:

SPI (Serial Peripheral Interface): синхронный последовательный интерфейс, который был разработан для обмена данными между микроконтроллерами и периферийными устройствами, такими как сенсоры, датчики, дисплеи и другие. Он работает в полудуплексном режиме.

Архитектурно, SPI устроен так, что использует 4 сигнальные линии:

- SCLK (синхронный тактовый сигнал);
- MOSI (Master Out Slave In);
- MISO (Master In Slave Out);
- SS/CS (Slave Select \ Chip Select).

Сообщение в протоколе SPI представляет собой последовательность бит, которые передаются по линиям MOSI (Master Out Slave In) и MISO (Master In Slave Out).

Процесс отправления сообщения длиной 8-бит, которое передавалось по положительному фронту SCLK, а данные считывались по спадающему фронту SCLK [1, 4-7]. Главный процессор (master) отправляет байт данных 0xAB (10101011 в двоичной системе) на ли-

нию MOSI, а датчик или подчинённый процессор (slave) отвечает этим же байтом на линии MISO – процесс называется «эхо» и может использоваться при проверке работоспособности линии. В таком случае каждый бит данных передается на каждом тактовом переходе. Сначала master отправляет старший бит (MSB – Most Significant Bit), а slave считывает его. Затем передается следующий бит и так далее, пока не переданы все 8 бит сообщения. Необходимо согласовать настройки передачи данных между slave и master, полярность сигнала SCLK, так как в ином случае правильное чтение и запись информации могут быть нарушены.

I²C (Inter-Integrated Circuit): является синхронным последовательным интерфейсом, который используется для связи между микроконтроллерами и различными периферийными устройствами, такими как датчики, память, дисплеи, а также для обмена данными между несколькими микроконтроллерами.

Немаловажной особенностью для использования в БПЛА является энергосбережение в работе протокола датчиками. Сообщение в протоколе *I²C* (Inter-Integrated Circuit) представляет собой последовательность бит, передаваемых последовательно по двум линиям - линия данных (SDA) и линия тактирования сигнала (SCL). Протокол *I²C* работает в синхронном режиме, где тактовый сигнал SCL используется для синхронизации передачи данных между устройствами. *I²C* шина работает следующим образом.

1. Ведущие и ведомые устройства:

В шине I²C есть два типа устройств – ведущие (master) и ведомые (slave).

Master – устройство, которое иницирует коммуникацию и контролирует передачу данных. Slave – устройства, которые отвечают на запросы мастера и передают данные. Логично, что все датчики в БПЛА будут ведомыми.

2. Две линии: Шина I2C состоит из двух линий - линия данных (SDA) и линия тактирования (SCL). Линия данных (SDA) используется для передачи данных, а линия тактирования (SCL) используется для синхронизации передачи данных между устройствами.

3. Состояние «старт-стоп»: Передача данных в шине I²C осуществляется по принципу смены состояний «старт-стоп».

Прежде чем начать передачу данных, ведущий отправляет условие "старт" (START) на шину, чтобы предупредить все устройства о начале передачи. После завершения передачи данных ведущий отправляет условие "стоп" (STOP) на шину, чтобы завершить передачу.

4. 7-битные и 10-битные адреса: Каждое устройство на шине I²C имеет свой уникальный адрес, по которому мастер может обратиться к нему. 7-битные адреса наиболее распространены, но также существуют 10-битные адреса для большего количества подключаемых устройств.

5. ACK/NACK: после передачи каждого байта данных, получающее ведомое устройство обязано отправить биты

подтверждения ACK (Acknowledgment) или отказ NACK (Not-Acknowledgment) ведущему. ACK символизирует ведущему, что передача прошла успешно, а NACK указывает на ошибку или отсутствие устройства.

6. Биты данных и тактовый сигнал: В I²C данные передаются последовательно, от старших битов к младшим, при этом передача данных на линии SDA может изменяться только, когда SCL имеет низкий логический уровень.

7. Скорости передачи: Шина I²C поддерживает различные скорости передачи данных, обычно от нескольких килобит в секунду до нескольких мегабит в секунду. «Узким горлышком» в передаче выступает производительность ведомых устройств – датчиков.

Сообщение в I²C состоит из следующих элементов (табл.1) [1, 7-9]:

1. Начальное условие (Start Condition): Ведущий (master) генерирует биты инициализации на линии SDA, чтобы указать на начало передачи данных. Стартовое условие состоит из перехода с высокого уровня (логической 1) на низкий уровень (логический 0) на линии SDA, при удержании линии SCL в высоком уровне.

2. Адрес устройства (Address Byte): после стартового условия master сообщает адрес устройства, с которым он хочет общаться, он состоит из 7 бит, и младший значимый бит инструкции указывает, является ли запрашиваемая операция - чтением или записью. Если младший бит адреса равен 0, это озна-

чает операцию записи, если равен 1 – операцию чтения.

3. *Бит подтверждения (Acknowledge Bit)*: после передачи адреса устройства, получатель отправляет бит подтверждения, чтобы указать, что он готов принять данные. Если устройство готово принять данные, оно устанавливает линию SDA в низкий уровень (логический 0) во время следующего тактового импульса. Если устройство не готово принять данные или произошла ошибка, линия SDA остается в высоком уровне (логическая 1).

4. *Данные (Data Bytes)*: после передачи адреса и получения бита подтверждения, master и устройство могут обмениваться данными. Каждый байт данных передается последовательно, начиная со старшего бита (MSB) и заканчивая младшим значимым битом (LSB – Least Significant Bit).

5. *Бит подтверждения (Acknowledge Bit)*: после передачи каждого байта данных, получатель также отправляет бит подтверждения, чтобы указать, что он успешно принял данные.

6. *Конечное условие (Stop Condition)*: Master генерирует сигнал остановки, чтобы указать на окончание передачи данных. Конечное условие состоит из перехода с низкого уровня (логический 0) на высокий уровень (логический 1) на линии SDA, при удержании линии SCL в высоком уровне.

I²C поддерживает много ведущих устройств на линии одновременно, однако в БПЛА стоит придерживаться одного master на линии, чтобы не приводить к конфликтам и коллизиям на шине, или проводить грамотное планирование и управление шиной во избежание ошибок и неправильного чтения \ записи данных.

Таблица 1. Структура передачи одного байта данных (0xAB) ведущим устройством клиенту

Table 1. Structure of transmission of one data byte (0xAB) from the master to the client

Начало / Start	Адрес / Address	Ack (бит под- тверждения) / Ack (confirma- tion bit)	Данные (0xAB) / Data (0xAB)	Ack (бит под- тверждения) / Ack (confirma- tion bit)	Конец / Stop
S	1010100	0	101010111	0	P

Примечание: **S** – Начальное условие; **P** – Конечное условие; **Ack** – Бит подтверждения.

UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) – асинхронный последовательный интерфейс, который используется для передачи данных между устройствами. Он широко применяется в связке с компьютерами, периферий-

ными устройствами и микроконтроллерами, работая в полудуплексном режиме, он использует 2 сигнальные линии – Tx (сигнал передачи) и Rx (сигнал приёма) (таб.2). Сообщение в UART состоит из следующих элементов:

1. *Начальный бит (Start Bit)*: всегда имеет значение 0. Этот бит служит для синхронизации приемника и указывает начало передачи символа.

2. *Данные (Data Bits)*: Количество данных битов зависит от настроек UART и может быть 5, 6, 7 или 8 бит. В БПЛА часто используется 7 и 8 бит длины сообщений.

3. *Бит четности (Parity Bit)*: это опциональный бит, который может быть использован для обеспечения контроля четности данных. В зависимости от выбранного режима (четный или нечетный), бит четности может быть установлен как 0 или 1.

4. *Конечный бит (Stop Bit)*: обычно имеет значение 1 и используется для завершения передачи символа.

Таблица 2. Структура сообщения UART с 8-битными данными, без бита четности и одним конечным битом

Table 2. UART message structure with 8-bit data, no parity bit and one tail bit

Start Bit	Data Bits (8 бит)	Stop bit
0	01101011	1

В данном сообщении содержится 8 бит данных (01101011), стартовый бит (0) и один стоповый бит (1).

Каждый символ передается последовательно, и после передачи одного символа следует небольшая пауза (интервал между символами), прежде чем начнется передача следующего символа.

1. Для скорости 9600 бит/с (9600 baud) длительность паузы составила около 110 микросекунд.

2. Для скорости 115200 бит/с (115200 baud) длительность паузы составила около 9 микросекунд.

Структура сообщения в UART может изменяться в зависимости от настроек протокола и устройств, между которыми происходит обмен данными. При использовании UART нужно обязательно согласовывать настройки (битовую скорость, количество данных бит и т.д.) между отправителем и получателем для успешной передачи и приема данных.

лем для успешной передачи и приема данных.

Jitter (фазовое дрожание цифрового сигнала данных) — непредсказуемое изменение временных интервалов между символами в передаче данных через UART и/или другой протокол, которое может возникать из-за неточности внутренних часов устройств, электромагнитных помех, а также шумов на линиях связи и других факторов. Джиттер может приводить к ошибкам в приеме данных и вызывать некорректную интерпретацию символов (рис.1) [5-7].

Логический анализатор при скорости в 115200 бод не увидел границы сообщений – старт и стоп биты. Поэтому, показывает предупреждения Frame Error, которые символизируют искажения полученной информации и требуют обратить внимание на этот фрагмент данных. Если отобразить визуально – то

полученные данные при скорости в 9600 бод, декодированные как полученные при 115200 бод, будут отображаться совсем иначе.

Джиттер может также вызывать искажения Frame (пакета), он зависит от точности и стабильности работы системы. В БПЛА же, зачастую, посредством электромагнитных помех и воздействий температуры могут создаваться потери и искажения сообщений. Используя специальные микросхемы, которые обеспечивают стабильность часов (точное внешнее тактирование с кварцевого резонатора или генератора), выполнять коррекцию уже существующих ошибок (ЕСС) возможно [10-15].

Говоря про разные платформы для производства БПЛА, стоит упомянуть, что в них может быть различное количество интерфейсов – в зависимости от центрального процессора, сопроцессоров или другой встроенной логики и периферии. Применимо к Raspberri Pi 3 и дрону, основанном на микроконтроллере STM32F407VGT6, можно составить сравнительную таблицу (табл. 3).

Raspberri Pi 3 имеет только один встроенный UART порт (UART0), в то время как STM32F407VGT6 обладает несколькими встроенными UART портами. STM32F407VGT6 предоставляет больше гибкости в выборе количества бит данных (8 или 9) и стоп-битов (1, 1.5 или 2).

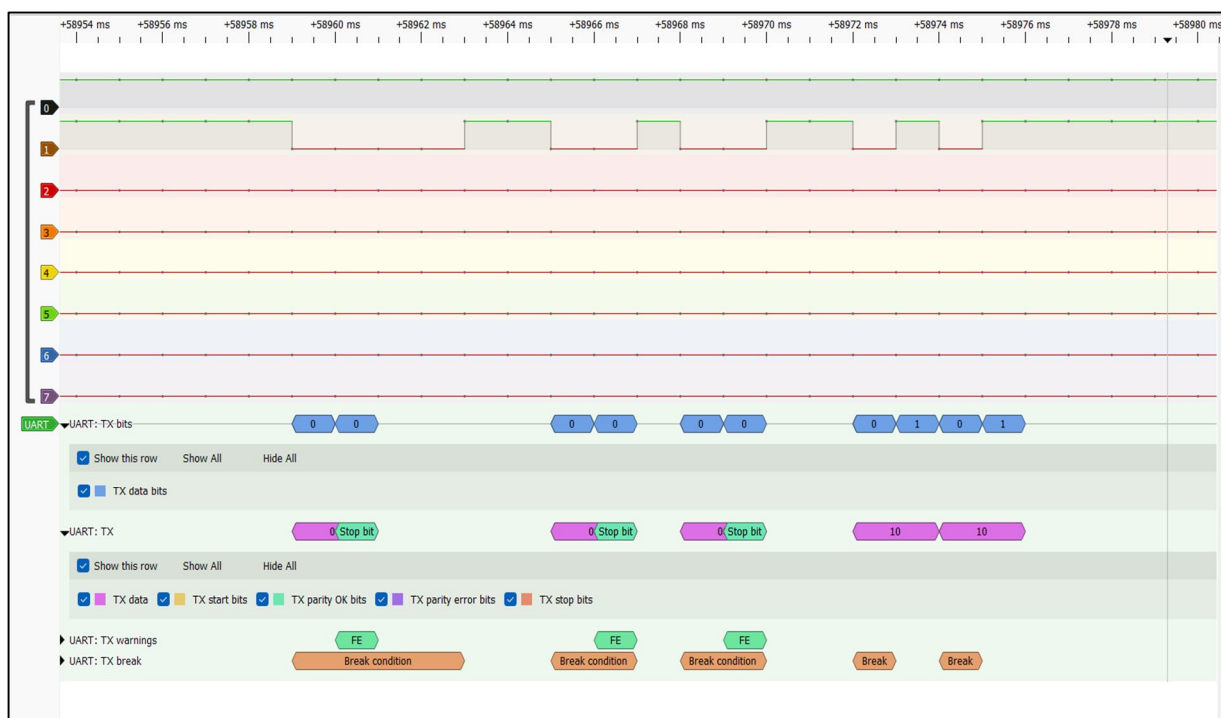


Рис. 1. Снимок выборки, декодированной как UART на скорости 115200 бод

Fig. 1. Snapshot of sample decoded as UART at 115200 baud

Таблица 3. Сравнительная характеристика поддержки UART**Table 3.** Comparative characteristics of UART support

Характеристика / Characteristic	Raspberry Pi 3	STM32F415VGT6
Количество UART	1 встроенный UART (UART0)	Несколько встроенных UART портов
Скорость передачи данных	Различные скорости до 921600 bps	Различные скорости до нескольких мегабит в секунду
Биты данных	8	8 или 9 (по выбору)
Биты контроля четности	Отсутствует	Можно выбрать или отключить
Стоп-биты	1 или 2	1, 1.5 или 2 (по выбору)

Джиттер также может вызывать смещение временных интервалов в выборке логического анализатора между символами, что приводит к неправильному распознаванию символов. Могут искажённо интерпретироваться стартовый бит, биты данных и стоп-бит, что обязательно приведёт к ошибкам в декодировании передаваемой информации. В случае, если джиттер слишком велик, логический анализатор может потерять символы, что приведет к потере части или всего сообщения.

Потеря данных в джиттере особенно опасна в случае передачи критически важной информации, такой как управляющие команды или показания датчиков, а это, в свою очередь, может привести к неправильным действиям или потере ценных данных для управления БПЛА.

Джиттер может сильно ухудшить надежность связи по UART между БПЛА и его контроллером или другими устройствами, а это может привести к

потере связи в критических моментах, что может вызвать сбой в работе БПЛА или даже его потерю.

Результаты и их обсуждения

Ошибки интерпретирования стартового и стоп-битов приведут к неправильному определению границы символов и протокольных пакетов, а это, в свою очередь, помешает декодированию всего сообщения [1,4,16-18].

Ardupilot — открытое программное обеспечение (распространяемое по лицензии «Open Source» – открытые (бесплатные и опубликованные) исходные коды для некоммерческого использования) для автономного управления БПЛА и другими робототехническими платформами.

Чтобы собрать полноценный БПЛА на основе Ardupilot требуется:

– Основная плата с программным комплексом Ardupilot. Для тестирования собран аналог Pixhawk 4.

– Контроллер полёта (плата-пульт, которая позволяет управлять перемещением самодельного БПЛА – это может быть Pixhawk, Pixhawk 2, Pixhawk 4 и другие. Пульт пересылает данные об управлении на дрон как Mavlink сообщения) (рис.2).

Информационные протоколы

MAVLink (Micro Air Vehicle Communication Protocol) – это протокол обмена сообщениями для беспилотных летательных аппаратов, который разрабатывался для обеспечения связи между автономными системами и внешними устройствами [7-9].

MavLink разрабатывался с учетом ограниченных ресурсов микроконтроллеров, которые используются в автономных системах, что, несомненно, полезно в работе с БПЛА.

Mavlink – информационный протокол, который основывается на более низкоуровневых протоколах. Поэтому, Mavlink может быть реализован на базе UART, SPI, I2C, в зависимости от возможностей, процессорной базы и архитектуры дрона.

Например, для обмена данными между контроллером полета и компьютером на земле часто используется UART, а для взаимодействия с датчиками могут применяться различные интерфейсы, такие как I²C или SPI.

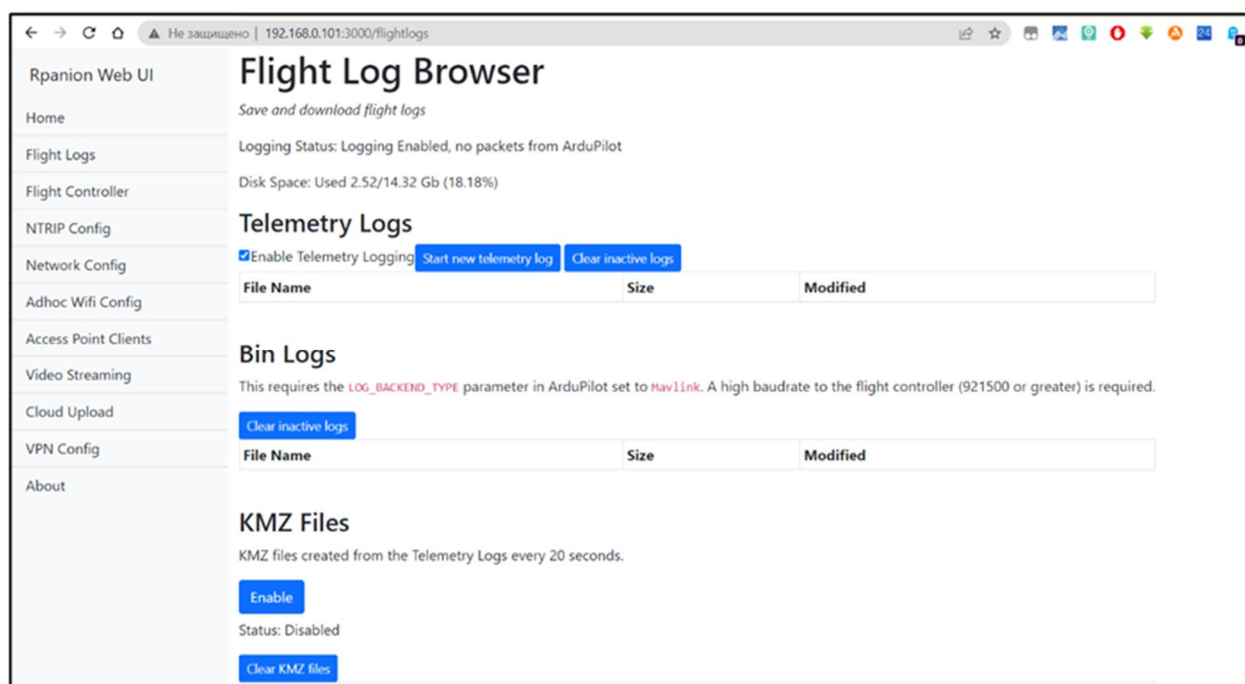


Рис. 2. Интерфейс Ardupilot

Fig. 2. Ardupilot interface

MavLink является важным протоколом для обеспечения связи между

беспилотными летательными аппаратами и внешними устройствами, позволяя

передавать и получать данные о состоянии, навигации и управлении, что делает его основой для разработки автономных и управляемых БПЛА.

Разберу отправленное сообщение «HEARTBEAT»:

Оно отправляется периодически системой БПЛА и служит для информирования внешнего устройства (например, наземной станции), о том что дрон работает и сообщает базовую информацию о себе, нужно это, чтобы контролировать связь и статус БПЛА в реальном времени и принимать соответствующие действия на основе этих данных.

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) — это протокол обмена сообщениями, который был разработан для передачи данных между устройствами в условиях ограниченной пропускной способности или ненадежным соединением.

Протокол MQTT работает по алгоритму:

1. *Подписка ведущим устройством на шину ведомого (Subscribe):*

Клиент может подписаться на определенную шину, чтобы получать информацию или команды от брокера сообщений. Команда подписки содержит имя шины и уровень желаемого QoS (Quality of Service) – уровня обслуживания, который определяет гарантии доставки сообщений. Чтобы подписаться, необходимо отправить команду *SUBSCRIBE*.

2. *Опубликовать сообщение (Publish):*

Клиент может отправить сообщение на определённую шину, чтобы передать информацию или команду другим клиентам, которые подписаны на эту шину.

Опубликованное сообщение содержит имя шины, данные и уровень QoS. Чтобы отправить сообщения, необходимо отправить команду *PUBLISH*.

3. *Отписаться от топика (Unsubscribe):*

Клиент может отписаться от определенной шины, чтобы больше не получать сообщения с этой шины и от брокера сообщений. Отписка осуществляется с помощью команды *UNSUBSCRIBE*.

4. *Получение подтверждения (Acknowledgement).*

В данном сообщении, наземная станция запрашивает у БПЛА текущие инструкции. Клиент публикует сообщение с запросом на шину "commands":

PUBLISH

Topic: commands

Data: "Request instructions"

QoS: 1

БПЛА через брокера сообщений получает это сообщение и высылает в ответ выполняемые инструкции на шину Instructions (взлёт, полёт на координаты Санкт-Петербурга, центр города, посадка):

PUBLISH

Topic: instructions

Data: "Take off, fly to coordinates (59.9343, 30.3351), land"

QoS: 1

Синтаксис команд и названия топиков зависят от версии управляющего ПО, платы контроллера дрона и т.д., важно чтобы они были синхронизированы. Сам протокол MQTT может использоваться поверх различных физических интерфейсов, таких как UART, SPI и Ethernet.

MQTT, будучи разработанным для работы в мире IoT («Internet of Things» с англ. – Интернета вещей) – более гибкое архитектурное решение, он может использоваться в системах реального времени (операционных системах реального времени). Также он более энергосберегающий и адаптирован под централизованные системы с ведущими и ведомыми устройствами, где брокеры

сообщений связывают всех воедино, что позволяет применять его гибридно.

MavLink же был разработан для БПЛА, его архитектура и структура сообщений оптимизированы для использования в ограниченных ресурсах микроконтроллеров, что делает его предпочтительным для автономных систем с высокой задержкой и пропускной способностью.

TCP\UDP (табл. 4)

TCP (Transmission Control Protocol) и UDP (User Datagram Protocol) – это 2 основных протокола транспортного уровня, используемых в сетевых коммуникациях. В БПЛА они используются для обмена данными между устройствами и серверами или управляющими центрами \ наземными станциями [16-20].

Таблица 4. Сравнение транспортных протоколов TCP и UDP

Table 4. Comparison of TCP and UDP transport protocols

Протокол / Characteristic	Надежность / Protocol Reliability	Установка соединения / Connection setup	Потокоориенти- рованность / Flow orientation	Тип данных / Data type
TCP (Transmission Control Protocol)	Гарантирует надежную передачу данных. Переотправляет потерянные или поврежденные пакеты	Требует установки соединения перед передачей данных, что вызывает некоторую задержку	Потокоориентированный: передает данные в виде непрерывного потока	Поток данных (поток байтов)
UDP (User Datagram Protocol)	Не гарантирует доставку данных и их упорядочивание	Не требует установки соединения, что делает его быстрее и более эффективным	Не потокоориентированный: работает с дейтаграммами, которые могут быть обработаны независимо	Дейтаграммы (небольшие пакеты данных)

В БПЛА логично использовать TCP соединения в случае, когда надёжность передачи данных является критическим аспектом и недопустима потеря данных. Например, команды управления БПЛА должны отправляться в TCP, чтобы все пакеты в запросе были точно доставлены и выполнены в нужном порядке.

UDP же позволяет в условиях низкой задержки времени передачи данных передавать данные в реальном времени – это важно для передачи телеметрических данных о полёте или видео с камеры в БПЛА, где высокая скорость и минимальная задержка более критична, чем надёжность передачи информации.

В зависимости от конкретного сценария использования, можно комбинировать оба протокола: TCP для надёжной передачи важных данных и UDP для передачи данных с низкой задержкой в реальном времени.

Но помимо ручного комбинирования протоколов, есть и «легковесные реализации» для IP протокола целиком.

LWIP (Lightweight IP) – стек протоколов для работы с сетевыми протоколами, который широко используется во встроенных системах и микроконтроллерах, включая применение в БПЛА.

Как и протокол IP, по умолчанию LWIP не предоставляет механизмов безопасности, таких как шифрование данных или аутентификация. Это означает, что безопасность LWIP зависит от других слоев стека протоколов, таких как TLS \ SSL для обеспечения безопасности данных при использовании TCP. Администратору необходимо обеспечить правильную конфигурацию и реализацию служб безопасности в БПЛА с использованием LWIP, чтобы защитить данные от несанкционированного доступа и перехвата самостоятельно

Структура пакета IP (и LWIP)

IP-пакет состоит из заголовка и данных. IP-пакет имеет следующую структуру:



Рис. 3. Структура пакета IP (и LWIP)

Fig. 3. IP (and LWIP) Packet Structure

Он состоит из основных элементов:

1. Версия и длина: определяет версию протокола IP и длину заголовка пакета.

2. Тип сервиса (обслуживания): используется для указания приоритета обработки пакета в сети.

3. Длина пакета: указывает общую длину пакета (в байтах), включая заголовок и данные.

4. Идентификатор пакета: идентификатор, присвоенный пакету для его идентификации.

5. Флаги и смещение: используются при фрагментации больших пакетов.

6. Время жизни (TTL): указывает количество шагов, которые пакет может сделать по сети, прежде чем будет отброшен.

7. Протокол IP: определяет протокол верхнего уровня, к которому передаются данные из поля "Данные".

8. Контрольная сумма: используется для проверки целостности заголовка пакета.

9. IP-адрес отправителя и получателя: указываются IP-адреса отправителя и получателя пакета.

10. Дополнительные опции: могут присутствовать в заголовке и содержат дополнительные настройки или параметры.

11. Данные: содержимое пакета, которое будет передано протоколу верхнего уровня (например, TCP или UDP).

В LWIP соблюдается формат пакетов, как и теоретические постулаты модели OSI, он оптимизирован для работы на устройствах с ограниченными ресурсами, но в отличие от полноценного сте-

ка IP, LWIP не поддерживает некоторые продвинутое и менее используемые функциональности, в частности [15-20]:

1. IP-фрагментацию

LWIP не поддерживает автоматическую фрагментацию и сборку IP-пакетов, что означает, что пакеты IP должны быть достаточно маленькими, чтобы поместиться во все промежуточные сети по пути следования до конечного получателя. В полноценном стеке IP есть механизмы автоматической фрагментации и сборки пакетов для обеспечения передачи больших данных.

2. IPsec (IP Security):

LWIP не включает поддержку IPSec, протокола, предназначенного для обеспечения безопасности передачи данных путем шифрования и аутентификации IP-пакетов. IPSec – это продвинутое расширение протокола IP, которое защищает данные от несанкционированного доступа.

3. ICMP (Internet Control Message Protocol):

LWIP поддерживает основные типы ICMP-сообщений, такие как эхо-запрос (echo-request/reply), но может не поддерживать все виды ICMP-сообщений, которые могут быть доступны в полноценном стеке IP.

4. Multicast и Broadcast:

LWIP может не поддерживать полноценную обработку широковещательных пакетов и адресацию группе абонентов.

5. IPv6 Extension Headers:

В LWIP нет повсеместной реализации протокола IPv6 не реализована

6. ARP (Address Resolution Protocol):

LWIP может поддерживать ARP только для основной функциональности, такой как разрешение MAC-адресов, но может быть ограничен в дополнительных возможностях, связанных с ARP.

LWIP не является заменой протокола IP (Internet Protocol). Вместо этого, LWIP позиционируется как отличная реализация стека протоколов TCP/IP, включая IP, для встраиваемых систем и микроконтроллеров с ограниченными ресурсами. Основное предназначение LWIP – обеспечить поддержку сетевых протоколов в ограниченных условиях, где полный стек TCP/IP слишком ресурсоемкий.

Негативные факторы ухудшения связи в БПЛА

Негативные факторы, которые могут ухудшить связь в БПЛА (Беспилот-

ные летательные аппараты), включают холодную пайку, дребезг контактов и помехи электромагнитного излучения (ПЭМИН). Холодная пайка – ошибка в процессе пайки, когда место пайки и контакт недостаточно прогревается или не образуется надлежащее соединение между элементами. Оно негативно влияет на передачу информации, в месте плохого контакта может искажаться проходимый сигнал (рис. 4).

Холодная пайка может привести к ненадежным соединениям и повышенному сопротивлению на паянных контактах, что может вызвать плохую передачу сигналов и ухудшение связи. Для борьбы с ней следует использовать качественные припой, флюсы, нагревать место соединений до правильной температуры и обеспечивать надлежащую связь между паяными контактами, прибегать к автоматизации процесса пайки.

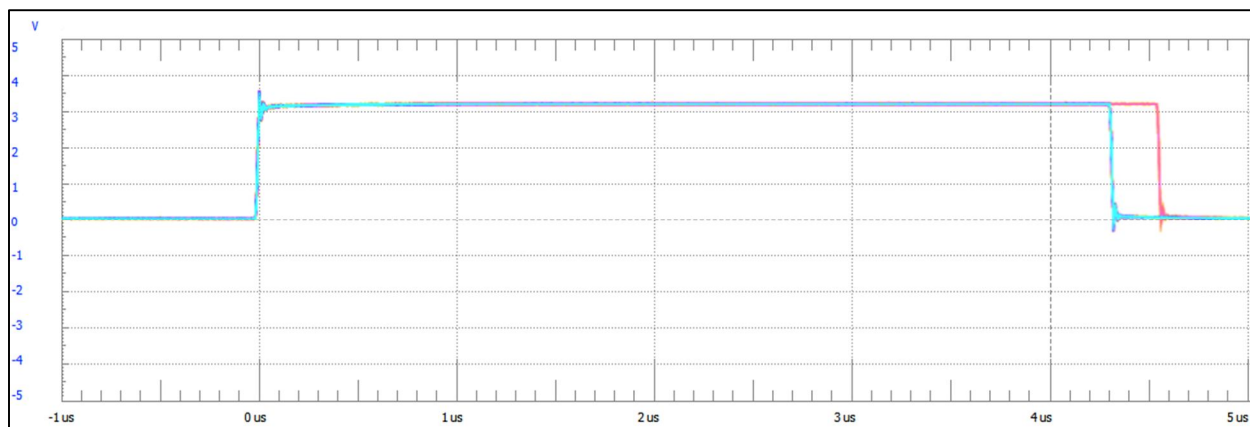


Рис. 4. Оциллограмма перекрёстно замкнутых TX и RX линий в момент отправки сообщения по протоколу UART

Fig. 4. Oscillogram of cross-connected TX and RX lines at the moment of sending a message via the UART protocol

Дребезг контактов – искажение сигнала, которое возникает при использовании механических контактов, когда кон-

такты многократно открываются и закрываются на коротких промежутках времени. Он может привести к непред-

сказуемым изменениям сигналов и прерываниям в передаче данных, что может повлиять на качество связи.

Для борьбы с дребезгом контактов можно использовать как аппаратные фильтры, так и программные алгоритмы фиксации и использование стабильных и надежных механических контак-

тов. На практике, подобные скорости в связке с БПЛА недостижимы на текущий момент времени и уровне развития информационных технологий. Проведя практические испытания в ходе исследования, была составлена таблица практической оценки протоколов потоковой передачи (табл.5):

Таблица 5. Сравнение протоколов потоковой передачи видео по надёжности

Table 5. Comparison of video streaming protocols by reliability

№	Протокол / Protocol	Оценка надёжности / Reliability Assessment	Обоснование / Justification /
1	SRT	Высокая	SRT обладает механизмами для обнаружения и восстановления потерянных пакетов данных, что делает его надежным в условиях сетевых неполадок и потерь. Поддерживает адаптивную потоковую передачу, которая позволяет приспосабливаться к изменениям в сети и обеспечивать стабильную передачу данных
2	WebRTC	Высокая	WebRTC использует прямую пиринговую коммуникацию, что минимизирует задержки и уменьшает зависимость от серверов. Предоставляет механизмы для обнаружения и восстановления потерянных пакетов, что делает его надежным в условиях нестабильных сетей
3	RTP	Высокая	RTP предоставляет низкоуровневые механизмы транспортировки данных и обычно используется совместно с другими протоколами, такими как RTCP (Real-Time Control Protocol), что позволяет обнаруживать потерянные пакеты и восстанавливать поток данных
4	RTSP	Средняя	RTSP предназначен для управления потоками данных, а не для их транспортировки. Он обычно используется с другими протоколами, такими как RTP, для передачи мультимедиа данных. Надежность RTSP зависит от выбранного транспортного протокола (например, RTP) и его механизмов обнаружения ошибок

Для передачи служебной информации требования к сети гораздо ниже, при анализе учитывается, что:

1. Размер пакета Heartbeat и информации о датчиках погоды составляет 100 байт.

2. Средний размер команд MAVLink и MQTT прием равным 50 байт.

3. Частота отправки Heartbeat и данных о датчиках с БПЛА на землю - 1 раз в секунду.

4. Частота отправки команд с земли на БПЛА – 30 команд в секунду.

5. Объем данных от команд с земли на БПЛА прием равным 1500 байт в секунду (30 команд * 50 байт).

Проведя теоретические расчёты, получаем:

– С БПЛА на землю: объем данных Heartbeat и информация о датчиках: $(100 \text{ байт/сек} * 8 \text{ бит/байт}) / (1 \text{ Кбит/сек}) = 0,8 \text{ Кбит/сек}$.

– С земли на БПЛА: $(1500 \text{ байт/сек} * 8 \text{ бит/байт}) / (1 \text{ Кбит/сек}) = 12 \text{ Кбит/сек}$.

Таким образом, для передачи данных с БПЛА на землю требуется примерно 0,8 Кбит/сек интернет-трафика, а для передачи команд с земли на БПЛА требуется примерно 12 Кбит/сек интернет-трафика, не учитывая задержку в сети и возможную потерю пакетов.

В ходе анализа объема интернет-трафика, переданных данных управления БПЛА и информации о датчиках с учетом задержки, скорости передачи, потери данных и снижения скорости трафика при наборе скорости дроном удалось составить следующую таблицу (табл. 6).

С поправками: Задержка (latency) - 100 миллисекунд (0,1 секунды) в одну сторону (one-way latency); Скорость передачи (throughput) - 1,5 Мбит/сек (пропускная способность с земли на БПЛА).

Таблица 6. Объем интернет-трафика для данных управления и информации о датчиках

Table 6. Internet traffic volume for control data and sensor information

Скорость движения (км/ч) / Driving speed (km/h)	Задержка (в секундах) / Delay (in seconds)	Скорость соединения с учетом уменьшения (Мбит/сек) / Connection speed taking into account the reduction (Mbit/sec)	Размер данных с учетом задержки (в Кбит) / Data size with delay (in Kbit)	Время передачи (в секундах) / Transmission time (in seconds)
0	0.1	1,50	0.2	0.1
20	0.1	1.485	0.2	0.135
40	0.1	1.477	0.2	0.135
60	0.1	1.455	0.2	0.135
72	0.1	1.455	0.2	0.108
80	0.1	1,44	0.2	0.108
100	0.1	1.425	0.2	0.108

Ввиду небольшого объема данных задержка сети незначительно влияет на передачу команд БПЛА, что на больших скоростях не причинило неудобств в тестовых испытаниях.

Выводы

С помощью серии экспериментов и симуляций в статье оценивается эффективность предложенного подхода по снижению уязвимостей и смягчению потенциальных рисков, связанных с обменом данными в БПЛА. Результаты демонстрируют, что включение интеллектуальных компонентов в процесс обмена данными значительно повышает

общую безопасность информации, минимизируя нагрузку на системы БПЛА. Данное исследование вносит вклад в совершенствование безопасности информации для БПЛА, предоставляя практические знания по оптимизации протоколов обмена данными с использованием интеллектуальных компонентов. Полученные результаты окажут пользу операторам БПЛА, производителям и специалистам по безопасности, способствуя разработке более надежных и безопасных систем БПЛА, что является важным для безопасности и надежности их применения в современных приложениях.

Список литературы

1. Черный С. Г., Шипаренко Н., Чупаков М. Оценка нагруженности протоколов обмена данными для БПЛА на базе интеллектуальных компонентов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023. Т. 27, №3. С. 128-151. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-128-151>.
2. Аблец А. А., Стребков А. Н., Завгородняя Е. В. Опыт создания роя БПЛА в вооруженных силах иностранных государств // Военная мысль. 2022. № 6. С. 137-146. EDN ISYTIR.
3. Пенской И. С., Рогозин О. В. Нейро-нечеткий ПИД-регулятор в задаче угловой стабилизации мультироторного БПЛА // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2018. № 21. С. 320-327. EDN XNRSJV.
4. Актуальные вопросы управления группой БПЛА / И. Н. Балашенко, Н. А. Горыня, А. С. Гунько, В. И. Никонов // Динамика систем, механизмов и машин. 2022. Т. 10, № 1. С. 14-17. <https://doi.org/10.25206/2310-9793-2022-10-1-14-17>. EDN XHENPM.
5. Подоплекин Ю. Ф., Толмачев С. Г., Шаров С. Н. Информационно-управляющая система приведения беспилотных летательных аппаратов на движущееся судно // Информационно-управляющие системы. 2012. № 3(58). С. 22-28. EDN OYIGWZ.
6. Силкин А. А., Ивановский А. Н., Черный С. Г. Автоматизированная система управления БПЛА в пределах локальной системы позиционирования // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению "Робототехника": сборник

статей IV Всероссийской научно-технической конференции, Анапа, 20–21 июля 2022 года. Анапа: Федеральное государственное автономное учреждение "Военный инновационный технополис "ЭРА", 2022. С. 224-235. EDN WTLPIU.

7. Michels M., Wever H., Musshoff O. 'Drones take flight in forests: Uncovering the 'tree'-mendous potential and 'timber'-rific challenges for German forest managers by applying the technology acceptance model' // *Forest Policy and Economics*, 2023, № 157. P. 103077. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.103077>.

8. Zhu Z., Jeelani I., Gheisari M. 'Physical risk assessment of drone integration in construction using 4D simulation' // *Automation in Construction*. 2023. № 156. P. 105099. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105099>.

9. Garg V. et al. 'Drones in last-mile delivery: A systematic review on efficiency, accessibility, and Sustainability' // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2023. № 123. P. 103831. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103831>.

10. Кутахов В. П., Мещеряков Р. В. Управление групповым поведением беспилотных летательных аппаратов: постановка задачи применения технологий искусственного интеллекта // *Проблемы управления*. 2022. № 1. С. 67-74. <https://doi.org/10.25728/ru.2022.1.5>. EDN J LXUXI.

11. Мещеряков Р. В., Илюхин Б. В. Обзор соревновательной робототехники. Соревнования спортивных роботов // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2022. Т. 10, № 4. С. 255-260. <https://doi.org/10.31776/RTCJ.10402>. EDN ISXMEV.

12. Емельянов С.Г., Бобырь М. В., Бондаренко Б. А. Нечетко-логическая система распознавания цвета с помощью быстродействующего дефаззификатора // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2022. Т.26, № 4. С. 103-116. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-103-116>.

13. Емельянов С. Г., Бобырь М. В., Крюков А. Г. Исследование свойств алгоритма поиска в ширину для нахождения маршрута передвижения роботов // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2022. Т.26, №4. С. 39-56. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-39-56>.

14. Alwateer M., Loke S. W., Fernando N. Enabling drone services: Drone crowdsourcing and drone scripting // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 110035-110049. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2933234>. EDN ICGTGY.

15. Hassija V., Saxena V., Chamola V. Scheduling drone charging for multi-drone network based on consensus time-stamp and game theory // *Computer Communications*. 2020. Vol. 149. P. 51-61. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.09.021>. EDN WAIQEY.

16. Hu J., Lanzon A. An innovative tri-rotor drone and associated distributed aerial drone swarm control // *Robotics and Autonomous Systems*. 2018. Vol. 103. P. 162-174. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.02.019>. EDN MEFVVB.

17. Kim H., Chang W. Intuitive Drone Control using Motion Matching between a Controller and a Drone // Archives of Design Research. 2022. Vol. 35, no. 1. P. 93-113. <https://doi.org/10.15187/adr.2022.02.35.1.93>. EDN RTZJES.

18. Cocomo-Ortega J. A., Martinez-Carranza J. A compact CNN approach for drone localisation in autonomous drone racing // Journal of Real-Time Image Processing. 2022. Vol. 19, no. 1. P. 73-86. <https://doi.org/10.1007/s11554-021-01162-3>. EDN CFYATS.

19. An Optimization Approach to Minimize the Expected Loss of Demand Considering Drone Failures in Drone Delivery Scheduling / M. Torabbeigi, G. J. Lim, N. Ahmadian, S. J. Kim // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2021. Vol. 102, no. 1. <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01370-w>. EDN RBLKPP.

20. Noise Attenuation on IMU Measurement for Drone Balance by Sensor Fusion / M. L. Hoang, M. Carratu, V. Paciello, A. Pietrosanto // Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Virtual, Glasgow, 17–20 May 2021 года. Virtual, Glasgow, 2021. P. 9460041. <https://doi.org/10.1109/I2MTC50364.2021.9460041>. EDN HYQCOI.

References

1. Cherny S. G., Shiparenko N., Chupakov M. Assessment of Data Exchange Protocol Workload in Uavs on Intelligent Components. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(3): 128-151 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-128-151>

2. Ablec A. A., Strebkov A. N., Zavgorodnjaja E. V. Opyt sozdaniya roja BPLA v vooruzhennyh silah inostrannyh gosudarstv [The experience of creating a swarm of UAVs in the armed forces of foreign states]. *Voennaja mysl'*, 2022; (6): 137-146. (In Russ.). EDN ISYTIR.

3. Penskoj I. S., Rogozin O. V. Neuro-fuzzy PID controller in the problem of angular stabilization of a multicopter UAV. *Novye informacionnye tehnologii v avtomatizirovannyh sistemah = New information technologies in automated systems*, 2018; (2): 320-327. (In Russ.). EDN XNRSJV.

4. Balashenko I. N., Gorynja N. A., Gun'ko A. S., Nikonov V. I. Topical issues of UAV group management. *Dinamika sistem, mehanizmov i mashin = Dynamics of systems, Mechanisms and Machined*. 2022; 10 (1): 14-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.25206/2310-9793-2022-10-1-14-17>. EDN XHEHPM.

5. Podoplekin Ju. F., Tolmachev S. G., Sharov S. N. Information and control system for bringing unmanned aerial vehicles to a moving vessel. *Informacionno-upravljajushhie sistemy = Information and Control Systems*. 2012; (3):22-28. (In Russ.). EDN OYIGWZ.

6. Silkin A. A., Ivanovskij A. N., Chernyj S. G. Automated UAV control system within the local positioning system. In: *Sostojanie i perspektivy razvitija sovremennoj nauki po napravleniju "Robototekhnika". Sbornik statej IV Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konfer-*

encii = The state and prospects of development of modern science in the field of Robotics: Collection of articles of the IV All-Russian Scientific and Technical Conference. Anapa: Voennyj innovacionnyj tehnopolis "JeRA"; 2022. P. 224-235. (In Russ.). EDN WTLPIU.

7. Michels M., Wever H., Musshoff O. Drones take flight in forests: Uncovering the ‘tree’-mendous potential and ‘timber’-rific challenges for German forest managers by applying the technology acceptance model. *Forest Policy and Economics*. 2023; (157): 103077. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.103077>.

8. Zhu Z., Jeelani I., Gheisari M. Physical risk assessment of drone integration in construction using 4D simulation. *Automation in Construction*. 2023; (156): 105099. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105099>.

9. Garg V. et al. Drones in last-mile delivery: A systematic review on efficiency, accessibility, and Sustainability. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2023; (123): 103831. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103831>.

10. Kutahov V. P., Meshherjakov R. V. Management of group behavior of unmanned aerial vehicles: setting the task of applying artificial intelligence technologies. *Problemy upravlenija = Problems of Management*. 2022; (1): 67-74. (In Russ.). <https://doi.org/10.25728/pu.2022.1.5>. EDN JLXUXI.

11. Meshherjakov R. V., Iljuhin B. V. Review of competitive robotics. Combinations of sports robots. *Robototekhnika i tehničeskaja kibernetika = Robotics and Technical Cybernetics*. 2022; 10 (4): 255-260. <https://doi.org/10.31776/RTCJ.10402>. (In Russ.). EDN ISXMEV.

12. Emelianov S. G., Bobyr M. V., Bondarenko B. A. Fuzzy-logic Color Recognition System Using a Fast Defuzzifier. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(4): 103-116 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-103-116>.

13. Emelianov S. G., Bobyr M. V., Kryukov A. G. Research of the Properties of the Breadth-First Search Algorithm for Finding the Movement Route of Robots. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(4): 39-56 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-39-56>.

14. Alwateer M., Loke S. W., Fernando N. Enabling drone services: Drone crowdsourcing and drone scripting. *IEEE Access*. 2019; (7): 110035-110049. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2933234>. EDN ICGTGY.

15. Hassija V., Saxena V., Chamola V. Scheduling drone charging for multi-drone network based on consensus time-stamp and game theory. *Computer Communications*. 2020; 149:51-61. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.09.021>. EDN WAIQEY.

16. Hu J., Lanzon A. An innovative tri-rotor drone and associated distributed aerial drone swarm control. *Robotics and Autonomous Systems*. 2018; 103: 162-174. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.02.019>. EDN MEFVVB.

17. Kim H., Chang W. Intuitive Drone Control using Motion Matching between a Controller and a Dron. *Archives of Design Research*. 2022; 35 (1): 93-113. <https://doi.org/10.15187/adr.2022.02.35.1.93>. EDN RTZJES.
18. Cocoma-Ortega J. A., Martinez-Carranza J. A compact CNN approach for drone localisation in autonomous drone racing. *Journal of Real-Time Image Processing*. 2022; 19 (1): 73-86. <https://doi.org/10.1007/s11554-021-01162-3>. EDN CFYATS.
19. Torabbeigi M., Lim G. J., Ahmadian N., Kim S. J. An Optimization Approach to Minimize the Expected Loss of Demand Considering Drone Failures in Drone Delivery Scheduling. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2021; 102 (1). <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01370-w>. EDN RBLKPP.
20. Hoang M. L., Carratu M., Paciello V., Pietrosanto A. Noise Attenuation on IMU Measurement for Drone Balance by Sensor Fusion. *Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Virtual, Glasgow, 2021. 9460041 p. <https://doi.org/10.1109/I2MTC50364.2021.9460041>. EDN HYQCOI.

Информация об авторах / Information about the Authors

Черный Сергей Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудование судов и эксплуатации производства, профессор кафедры КОИБ, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, Керченский государственный морской технологический университет, г. Керчь, Российская Федерация, e-mail: sergiiblack@gmail.com

Sergey G. Cherny, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Electrical Equipment of Ships and Production Operation Department, Professor of the Department of COIB, State University of Marine and River Fleet named after admiral S.O. Makarov, St. Petersburg, Russian Federation, Kerch State Marine Technological University, Kerch, Russian Federation, e-mail: sergiiblack@gmail.com

Зонтова Татьяна Владимировна, доктор технических наук, профессор кафедры боевого применения радиотехнических средств, Черноморское высшее военно-морское училище имени П.С. Нахимова, г. Севастополь, Российская Федерация, e-mail: zontova_tatyana@mail.ru

Tatyana V. Zontova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the of Combat Use of Radio-Technical Mean Department, Electrical Equipment Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov, Sevastopol, Russian Federation, e-mail: zontova_tatyana@mail.ru

Шапаренко Никита Витальевич, студент, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: nikita4shap@gmail.com

Nikita V. Shaparenko, Student, State University of Marine and River Fleet named after admiral S.O. Makarov, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: nikita4shap@gmail.com

УДК 004.82

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-114-133>

Разработка онтологической модели предметной области для обработки данных корпоративных хранилищ

Ю.А. Халин ¹, А.А. Афанасьев ² ✉, В.А. Кудинов ²

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

² Курский государственный университет
ул. Радищева, д. 33, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: afanasyevkursk@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Формализовать онтологическую модель предметной области исследования и разработать на ее основе модели данных для информационной системы извлечения и обработки ожиданий к качеству данных корпоративных хранилищ.

Методы. В данном исследовании были использованы онтологический подход и методы моделирования данных, а также формализована задача реализации модели данных с помощью понятийного аппарата и формального языка реляционной модели данных и теории множеств. В качестве подхода к моделированию использована модель «Сущность-связь» (англ. Entity-Relationship model).

Результаты. В результате исследования были разработаны концептуальная, логическая и физическая модели для реляционной базы данных информационной системы извлечения и обработки ожиданий к качеству данных корпоративных хранилищ на основе онтологии исследуемой предметной области. Это позволяет расширить возможности использования разрабатываемой в дальнейших исследованиях информационной системы в промышленной эксплуатации организациями, осуществляющими работы по созданию корпоративных хранилищ данных.

Заключение. В итоге, результаты исследования показали, что переход к использованию реляционной модели данных с сохранением онтологической семантики возможен и изучался рядом исследователей: наборы классов, отношений между ними и их атрибутов определены в онтологической модели, что делает возможным провести разработку моделей данных для реляционной базы данных без предположения необходимости изменений онтологии, а реляционная база данных, в свою очередь, может хранить экземпляры классов онтологии в отдельных таблицах для каждого класса, полями которых будут являться атрибуты конкретного класса.

Ключевые слова: качество данных; хранилище данных; онтология предприятия; онтологическое моделирование; реляционная база данных; концептуальная модель данных; логическая модель данных; физическая модель данных.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Халин Ю.А., Афанасьев А.А., Кудинов В.А. Разработка онтологической модели предметной области для обработки данных корпоративных хранилищ // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №2. С. 114-133. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-114-133>.

Поступила в редакцию 28.02.2024

Подписана в печать 17.04.2024

Опубликована 25.06.2024

Development of an ontological model of the subject area for corporate storage data processing

Yuri A. Khalin ¹, Alexander A. Afanasyev ² ✉, Vitaly A. Kudinov ²

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

² Kursk State University

33, Radishcheva str., Kursk 305000, Russian Federation

✉ e-mail: afanasyevkursk@gmail.com

Abstract

Purpose of research. Formalize an ontological model of the research subject area and develop, based on it, data models for an information system for extracting and processing expectations for the quality of corporate data storage.

Methods. In this study, an ontological approach and data modeling methods were used, and the task of implementing a data model was formalized using the conceptual apparatus and formal language of the relational data model and set theory. The Entity-Relationship model was used as a modeling approach.

Results. As a result of the research, conceptual, logical and physical models were developed for a relational database information system for retrieving and processing expectations for the quality of corporate data storage based on the ontology of the subject area under study. This allows us to expand the possibilities of using the information system developed in further research in industrial operation by organizations carrying out work on creating corporate data warehouses.

Conclusion. As a result, the results of the study showed that the transition to using a relational data model while preserving ontological semantics is possible and has been studied by a number of researchers: sets of classes, relationships between them and their attributes are defined in the ontological model, which makes it possible to develop data models for a relational database without providing for the need for ontology changes, and the relational database, in turn, can store instances of ontology classes in separate tables for each class, the fields of which will be the attributes of a particular class.

Keywords: data quality; data warehouse; enterprise ontology; ontological modeling; relational database; conceptual data model; logical data model; physical data model.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Khalin Y. A., Afanasyev A. A., Kudinov V. A. Development of an ontological model of the subject area for corporate storage data processing. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(2): 114-133 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-114-133>.

Received 28.02.2024

Accepted 17.04.2024

Published 25.06.2024

Введение

Одним из перспективных направлений, призванных удовлетворить современным требованиям к аналитиче-

ской работе в организациях, а также курсу на цифровизацию отечественной экономики (в целом) и деятельности предприятий (в частности), является со-

здание корпоративных хранилищ данных [1, 2, 3].

При этом важная проблема при создании корпоративных хранилищ данных заключается в необходимости определения и повышения уровня качества данных в них [4]. К тому же, исследователи выделяют работу над качеством данных как тренд цифровизации экономики¹ [5].

Однако процессы определения и повышения уровня качества данных на текущий момент слабо формализованы, а в наиболее распространенных методологиях под требованиями к качеству данных подразумеваются неструктурированные ожидания конкретных потребителей, что затрудняет процесс расчета и получения метрик качества данных.

Разработанные к настоящему времени подходы к извлечению и обработке ожиданий к качеству данных относятся к методам извлечения знаний. Однако указанные методы, имеющие место в инженерии знаний, еще недостаточно изучены в исследуемой предметной области – качество данных корпоративных хранилищ.

Исследуемая предметная область в отечественной практике построения корпоративных хранилищ является инновационной.

Следовательно, весьма актуальным для совершенствования подходов к из-

влечению и обработке ожиданий к качеству данных является проведение комплексного исследования возможностей автоматизации активных индивидуальных и групповых методов извлечения знаний, на основе чего представлялось бы возможным учитывать как теоретические положения самих методов, так и возможности современных MDM-, DG-систем, с помощью которых при построении корпоративных хранилищ в компаниях осуществляют организацию управления данными [6].

Таким образом, решение проблемы извлечения и обработки ожиданий к качеству данных корпоративных хранилищ требует решения таких задач, как создание алгоритма извлечения и обработки ожиданий к качеству данных корпоративных хранилищ, разработка метода детализации ожиданий к качеству данных до конкретных правил, разработка метода классификации правил к качеству данных.

Для разработки подобных методов и алгоритмов актуальна реализация модели данных на основе онтологии исследуемой предметной области, что требует постановки соответствующей задачи и ее формализации.

Материалы и методы

Для выбора метода описания предметной области исследования целесообразно провести сравнительную экспертную оценку различных подходов и выбрать наиболее оптимальный из них. Оценим по пятибалльной шкале такие методы, как ER-модель, UML-диаграммы

¹ Стратегия цифровой трансформации отрасли науки и высшего образования. 2021 / Министерство науки и высшего образования РФ. URL: https://www.minobrnauki.gov.ru/documents/?ELEMENT_ID=36749 (дата обращения: 05.12.2023).

классов, DFD, IDEF, ORM и онтологии, по следующим критериям: простота использования, эффективность представления связей между сущностями, уровень абстракции и формализации, возможности интеграции и семантической связности, гибкость и возможности модификации.

Рассмотрим значения оценок:

1 – эта оценка означает низкую эффективность метода в рассматриваемом критерии. Например, если метод оценен в 1 из 5 по критерию «Уровень абстракции и формализации», это означает, что метод предлагает низкий уровень абстракции и не обладает формализацией в достаточной степени;

2 – отражает ниже среднего уровень по рассматриваемому критерию. Метод может быть оценен так, если он демонстрирует некоторую эффективность, но все еще имеет значительные недостатки;

3 – оценка указывает на средний уровень по рассматриваемому критерию. Это означает, что метод достаточно хорошо справляется с этим критерием, но есть возможности для улучшения;

4 – уровень выше среднего, что говорит о высокой эффективности метода в рассматриваемом критерии, хотя все еще есть возможности для роста или улучшений;

5 – оценка, указывающая на высший уровень эффективности по рассматриваемому критерию. Такая оценка говорит о том, что метод отлично справляется с этим аспектом.

Результат оценки методов представлен в табл. 1.

Исходя из результатов оценки, для описания исследуемой предметной области и разработки базы данных наиболее подходящим методом является использование онтологий. Онтологии обладают следующими преимуществами в контексте разработки баз данных и описания предметных областей [7, 8, 9, 10].

1. Формализация знаний: Онтологии позволяют формализовать знания о предметной области с использованием явных связей, понятий и ограничений, что облегчает анализ и интеграцию данных.

2. Семантическая связность и стандартизация: Онтологии обеспечивают семантическую связность в базе данных, что снижает вероятность дублирования данных и позволяет однозначно интерпретировать значения.

3. Интеграция данных: Онтологии можно использовать для интеграции данных из различных источников, обеспечивая их согласованность и единое представление предметной области.

4. Гибкость и возможности модификации: Онтологии могут быть гибко модифицированы, что позволяет легко адаптировать базу данных к изменяющимся потребностям и требованиям предметной области.

5. Стандартизация и расширяемость: Онтологии предлагают стандартизированный подход к представлению знаний, что облегчает их расширение и поддержку в долгосрочной перспективе.

Таблица 1. Сравнительная экспертная оценка методов описания предметных областей**Table 1.** Comparative expert assessment of methods for describing subject areas

Критерий / Criteria Метод / The method	Простота использования / Ease of use	Эффективность представления связей между сущностями / Efficiency of representation of relationships between entities	Уровень абстракции и формализации / The level of abstraction and formalization	Возможности интеграции и семантической связности / Possibilities of integration and semantic connectivity	Гибкость и возможности модификации / Flexibility and possibilities of modification
ER-модель	4	5	3	3	3
UML-диаграммы классов	4	5	4	4	4
DFD	3	2	2	2	3
IDEF	3	4	4	3	4
ORM	4	5	4	4	4
Онтологии	3	5	5	5	4
Комментарий	ER-модель, UML-диаграммы классов и ORM предлагают относительно простые в использовании способы описания предметных областей.	ER-модель, UML-диаграммы классов, ORM и онтологии эффективно представляют связи между объектами в предметной области	Онтологии и ORM обладают высоким уровнем абстракции и формализации, что делает их более мощными инструментами для описания предметных областей	Онтологии являются лучшим методом для создания семантической связности и интеграции данных	UML-диаграммы классов, IDEF, ORM и онтологии обладают высокой гибкостью и возможностями модификации

Также применение онтологии на раннем этапе исследования было обосновано новизной исследуемой области обеспечения качества данных в корпоративных хранилищах и необходимостью определения исследуемого периметра предметной области для дальнейшей работы. Практическая значимость онтологической модели заключается в выявлении концептуальных классов этой предметной области, исследования в которой сейчас ведутся [11].

В процессе дальнейшего исследования предполагается подробно рассмотреть выделенные на рис. 1 классы и отношения для формализации задачи исследования [12].

Разработанная онтология предметной области исследования [13] отразила

множества классов и отношений. При этом, данная онтология позволяет выявить несколько особенностей, которые затрудняют работу в области оценки качества данных корпоративных хранилищ:

1) необходимость обмена данными между различными информационными системами в области управления данными (База данных, Каталог метаданных, Бизнес-гlossарий);

2) необходимость использования активных индивидуальных и групповых методов извлечения знаний;

3) последующая аналитическая обработка извлеченных знаний (классификация по измерениям качества данных, детализация ожиданий в правила для возможности последующей разработки проверок).

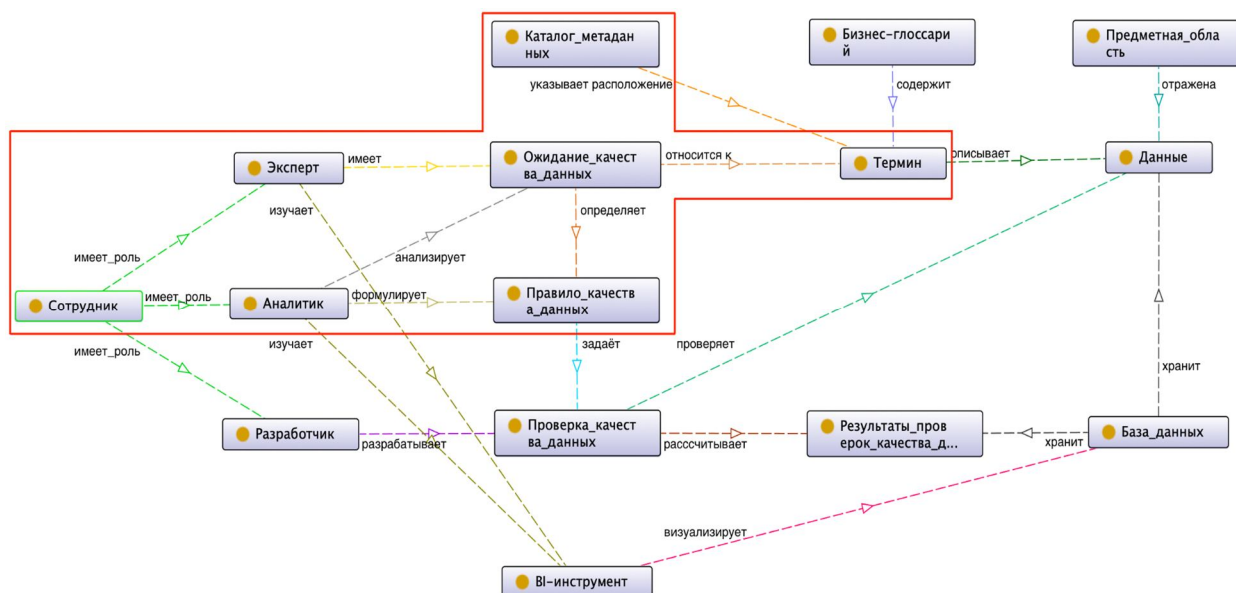


Рис. 1. Выделенная для дальнейшего исследования область онтологии извлечения ожиданий к качеству данных корпоративных хранилищ

Fig.1. The area of the ontology for extracting expectations for the quality of data in corporate warehouses has been identified for further research.

Перечисленные особенности делают процесс оценки уровня качества данных трудоемким, что увеличивает время от момента извлечения знаний до получения результатов проверок качества данных – агрегированной статистики с количеством проверенных объектов и ошибок, а также наборов данных с детальными результатами (идентификаторами проверенных объектов и описаний найденных ошибок в данных). Это снижает степень актуальности разработанных проверок или вовсе затрудняет их разработку из-за изменяющихся ожиданий.

Эти факторы позволяют сделать заключение об обоснованности поиска перспективных путей автоматизации извлечения и обработки ожиданий к качеству данных корпоративных хранилищ, которые позволят максимально сократить количество времени от извлечения ожиданий к качеству данных до разработки проверки, которая сможет отразить уровень качества данных в виде количественных характеристик и перечня ошибок, требующих исправления со стороны пользователей систем, поставляющих данные в корпоративное хранилище.

Задачу реализации модели данных можно формализовать с помощью реляционной модели данных и теории множеств. Перечисленные далее (табл. 2) атрибуты классов онтологической модели необходимы для представления классов и их экземпляров в виде отношений R с

точки зрения реляционной модели данных. Поскольку классы «Эксперт» и «Аналитик» являются подклассами «Сотрудник», отразим атрибут «Роль» этого класса для указания ролевой принадлежности сотрудника.

Так, класс «Термин» и его экземпляры представим в виде отношения R_T (рис. 2) как подмножества декартова произведения $T_1 \times T_2 \times T_3$ с заголовком H_T : {(Идентификатор, T_1), (Название, T_2), (Класс, T_3)} и телом B_T , определяемом как множество кортежей K_t , в котором каждый кортеж K_t , соответствующий заголовку H_T , является множеством упорядоченных пар $\langle T_j, t_i \rangle$, где T – название атрибута; j – индекс атрибута в заголовке; t – допустимое значения из соответствующего атрибуту множества T_j ; i – количество экземпляров класса.

Аналогично представим другие классы онтологической модели и их экземпляры в виде отношений R_M , R_E , R_P , R_W (рис. 3).

Так как классы онтологической модели, на основе которых определены перечисленные отношения, концептуально связаны, формализуем виды связей между ними (табл. 3).

Тело отношения R_T можно представить как множество экземпляров класса «Термин», определяемое как:

$$T = \{K_t \mid \forall K_t \in R_T\} :\Leftrightarrow \{ \langle t_{11}, t_{12}, t_{13} \rangle, \langle t_{21}, t_{22}, t_{23} \rangle, t_{31}, t_{32}, t_{33} \rangle, \dots, \langle t_{i1}, t_{i2}, t_{i3} \rangle \}, \quad (1)$$

где i – мощность отношения R_T .

Таблица 2. Атрибуты классов онтологической модели**Table 2.** Attributes of ontological model classes

Класс / Class	Атрибут / Attribute	Множество значений / Set of values
Термин	Идентификатор	T_1
	Название	T_2
	Класс	T_3 (при этом $T_3 = \{\text{Термин}\}$)
Каталог метаданных	Идентификатор	M_1
	Метаданные	M_2
	Идентификатор термина	M_3
	Класс	M_4 (при этом $M_4 = \{\text{Каталог метаданных}\}$)
Ожидание качества данных	Идентификатор	E_1
	Название	E_2
	Описание	E_3
	Идентификатор термина	E_4
	Идентификатор эксперта	E_5
	Класс	E_6 (при этом $E_6 = \{\text{Ожидание качества данных}\}$)
Правило качества данных	Идентификатор	P_1
	Название	P_2
	Описание	P_3
	Идентификатор ожидания	P_4
	Идентификатор аналитика	P_5
	Измерение качества данных	P_6
	Класс	P_7 (при этом $P_7 = \{\text{Правило качества данных}\}$)
Сотрудник	Идентификатор	W_1
	Роль	W_2 (при этом $W_2 = \{\text{Эксперт, Аналитик}\}$)
	Класс	W_3 (при этом $W_3 = \{\text{Сотрудник}\}$)

Аналогично, тела отношений R_M , R_E , R_P , R_W представим как множества M , E , P , W соответственно:

$$M = \{K_m \mid \forall K_m \in R_M\} : \Leftrightarrow \{ \langle m_{11}, m_{12}, m_{13}, m_{14} \rangle, \langle m_{21}, m_{22}, m_{23}, m_{24} \rangle, \langle m_{31}, m_{32}, m_{33}, m_{34} \rangle, \dots, \langle m_{k1}, m_{k2}, m_{k3}, m_{k4} \rangle \}, \quad (2)$$

где k – мощность отношения R_M ;

$$E = \{K_e \mid \forall K_e \in R_E\} : \Leftrightarrow \{ \langle e_{11}, e_{12}, e_{13}, e_{14}, e_{15}, e_{16} \rangle, \langle e_{21}, e_{22}, e_{23}, e_{24}, e_{25}, e_{26} \rangle, \langle e_{31}, e_{32}, e_{33}, e_{34}, e_{35}, e_{36} \rangle, \dots, \langle e_{x1}, e_{x2}, e_{x3}, e_{x4}, e_{x5}, e_{x6} \rangle \}, \quad (3)$$

где x – мощность отношения R_E ;

$$P = \{K_p \mid \forall K_p \in R_P\} : \Leftrightarrow \{ \langle p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}, p_{15}, p_{16}, p_{17} \rangle, \langle p_{21}, p_{22}, p_{23}, p_{24}, p_{25}, p_{26}, p_{27} \rangle, \langle p_{31}, p_{32}, p_{33}, p_{34}, p_{35}, p_{36}, p_{37} \rangle, \dots, \langle p_{y1}, p_{y2}, p_{y3}, p_{y4}, p_{y5}, p_{y6}, p_{y7} \rangle \}, \quad (4)$$

где y – мощность отношения R_P ;

$$W = \{K_w \mid \forall K_w \in R_W\} : \Leftrightarrow \{ \langle w_{11}, w_{12}, w_{13} \rangle, \langle w_{21}, w_{22}, w_{23} \rangle, \langle w_{31}, w_{32}, w_{33} \rangle, \dots, \langle w_{z1}, w_{z2}, w_{z3} \rangle \}, \quad (5)$$

где z – мощность отношения R_W .

Таким образом, каждый выделенный в онтологической модели класс будет рассматриваться в качестве множества кортежей, где каждый кортеж – экземпляр конкретного класса онтологической модели. Тогда выделенный на рис. 1 участок онтологической модели как формальная онтология будет иметь вид:

$$O = \langle T, M, E, P, W \rangle, \quad (6)$$

где T – конечное счетное множество кортежей (терминов Бизнес-гlossария);

M – конечное счетное множество кортежей (метаданных БД);

E – конечное счетное множество кортежей (ожиданий к качеству данных);

P – конечное счетное множество кортежей (правил качества данных);

W – конечное счетное множество кортежей (сотрудников).

Множества E и P могут быть пустыми и в рамках исследования предполагается, что:

$$E = \emptyset \wedge P = \emptyset. \quad (7)$$

	Идентификатор, T_1 / Id, T_1	Название, T_2 / Name, T_2	Класс, T_3 / Class, T_3
K_{t1}	t_{11}	t_{12}	t_{13}
K_{t2}	t_{21}	t_{22}	t_{23}
...	...	...	...
K_{ti}	t_{i1}	t_{i2}	t_{i3}

Рис. 2. Отношение R_T (термины бизнес-гlossария)

Fig. 2. R_T Relationship (Business Glossary Terms)

Отношение R_M				
	Идентификатор, M_1	Метаданные, M_2	Идентификатор термина, M_3	Класс, M_4
K_{m1}	m_{11}	m_{12}	m_{13}	m_{14}
K_{m2}	m_{21}	m_{22}	m_{23}	m_{24}
...	...	...	...	...
K_{mk}	m_{k1}	m_{k2}	m_{k3}	m_{k4}

Отношение R_E						
	Идентификатор, E_1	Название, E_2	Описание, E_3	Идентификатор термина, E_4	Идентификатор эксперта, E_5	Класс, E_6
K_{e1}	e_{11}	e_{12}	e_{13}	e_{14}	e_{15}	e_{16}
K_{e2}	e_{21}	e_{22}	e_{23}	e_{24}	e_{25}	e_{26}
...	...	...	...	...	...	...
K_{ex}	e_{x1}	e_{x2}	e_{x3}	e_{x4}	e_{x5}	e_{x6}

Отношение R_P							
	Идентификатор, P_1	Название, P_2	Описание, P_3	Идентификатор ожидания, P_4	Идентификатор аналитика, P_5	Измерение качества данных, P_6	Класс, P_7
K_{p1}	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{14}	p_{15}	p_{16}	p_{17}
K_{p2}	p_{21}	p_{22}	p_{23}	p_{24}	p_{25}	p_{26}	p_{27}
...	...	...	...	...	...	...	...
K_{p7}	p_{71}	p_{72}	p_{73}	p_{74}	p_{75}	p_{76}	p_{77}

Отношение R_W			
	Идентификатор, W_1	Роль, W_2	Класс, W_3
K_{w1}	w_{11}	w_{12}	w_{13}
K_{w2}	w_{21}	w_{22}	w_{23}
...	...	...	...
K_{w7}	w_{71}	w_{72}	w_{73}

Рис. 3. Отношения R_M (метаданные), R_E (ожидания к качеству данных), R_P (правила качества данных), R_W (сотрудники)

Fig. 3. Relationships R_M (metadata), R_E (data quality expectations), R_P (data quality rules), R_W (employees)

Таблица 3. Связи между отношениями R_T , R_M , R_E , R_P , R_W

Table 3. Connections between the relations R_T , R_M , R_E , R_P , R_W

Связь отношений / Relationship relationship	Характер связи / The nature of the connection	Условия связи (атрибуты как первичные и внешние ключи) / Communication conditions (attributes as primary and foreign keys)
$R_T \xrightarrow{N} R_M$	Один ко многим	$T_1 = M_3$
$R_T \xrightarrow{U} R_E$	Один к одному	$T_1 = E_4$
$R_E \xrightarrow{N} R_Q$	Один ко многим	$E_1 = P_4$
$R_W \xrightarrow{U} R_E$	Один к одному	$W_1 = E_5 \wedge W_2 = \text{Эксперт}$
$R_W \xrightarrow{U} R_P$	Один к одному	$W_1 = P_5 \wedge W_2 = \text{Аналитик}$

Целью дальнейших исследований станет наполнение этих множеств элементами, соответствующими элементам множеств T , M , W , с помощью разрабатываемых моделей и алгоритмов.

Рассмотрим следующие ситуации:

1. При $T = \emptyset$, $M = \emptyset$, $W = \emptyset$ – в этом случае дальнейшее исследование не имеет смысла, так как отсутствуют термины глоссария, метаданные, сотрудники.

2. При $T \neq \emptyset$, $M = \emptyset$, $W = \emptyset$ или $T \neq \emptyset$, $M \neq \emptyset$, $W = \emptyset$ или $T = \emptyset$, $M \neq \emptyset$, $W = \emptyset$ дальнейшее исследование также не имеет смысла, поскольку множество сотрудников пусто, что делает невозможным наполнение множества E элементами.

3. При $T \neq \emptyset$, $M = \emptyset$, $W \neq \emptyset$ – дальнейшее исследование возможно, но отсутствие метаданных затруднит детализацию ожиданий к качеству данных.

Таким образом, в рамках исследования считается, что множества T , W не должны быть пустыми:

$$T \neq \emptyset \wedge W \neq \emptyset. \quad (8)$$

Так как если они пусты, то наполнение множества E невозможно из-за отсутствия терминов и сотрудников, которые могут иметь ожидания к качеству данных в соответствии с онтологической моделью.

Результаты и их обсуждение

Проведенное исследование подходов к моделированию данных на основе онтологии предметной области качества данных корпоративных хранилищ показывает, что использование реляционных баз данных целесообразно для хранения

онтологий [11, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 8, 20, 12, 21, 22].

Поскольку в процессе формализации онтологической модели использовались понятия реляционной модели данных для формального отражения отношений между классами, множества элементов каждого выделенного класса рассматриваются в качестве множеств кортежей, где каждый кортеж – экземпляр конкретного класса онтологической модели [17, 18]. В связи с этим, в ходе дальнейшего исследования актуально разработать модели данных для служебной реляционной базы данных информационной системы извлечения и обработки ожиданий к качеству данных корпоративных хранилищ с целью сохранения онтологических связей между выделенными классами (см. рис. 1).

Переход к реляционной модели данных в дальнейшей работе обусловлен повышением степени практической значимости исследования в целом, так как специалистами по управлению данными более изучены реляционные модели данных, а не онтологические. Так как наборы классов, отношений между ними и их атрибутов определены в онтологической модели, это делает возможным провести разработку моделей данных для реляционной базы данных без предположения необходимости изменений онтологии. Так, реляционная база данных может хранить экземпляры классов онтологии в отдельных таблицах для каждого класса, полями кото-

рых будут являться атрибуты конкретного класса. Такая реализация позволит сделать взаимодействие с системой более доступным как для пользователей, так и для интеграции с необходимыми системами для получения данных об экземплярах, например, Бизнес-гlossариями и Каталогами метаданных. Таким образом, данный переход повышает возможности использования результатов исследования в промышленной эксплуатации организациями, осуществляющими работы по созданию корпоративных хранилищ данных [11].

Реляционная модель данных – это наиболее распространенный подход к моделированию баз данных, который основывается на использовании таблиц для хранения данных. Данный подход был предложен Эдгаром Коддом в 1970 году [21]. Реляционная модель данных имеет простую структуру, обеспечивает эффективный поиск и изменение данных, а также обеспечивает целостность данных. В качестве подхода к моделированию целесообразно использовать модель «Сущность-связь» (англ. Entity-Relationship model) – это подход к моделированию реляционных баз данных, который основывается на использовании сущностей и их связей для описания данных. Данный подход был предложен Питером Ченом в 1976 году [22]. Преимущество этого подхода в рамках данного исследования заключается в том, что он имеет много общего с онто-

логическим подходом и позволяет связать понятия онтологии с понятиями реляционной модели данных.

Первым этапом разработки моделей данных для реляционной базы данных является разработка концептуальной модели данных. Питер Чен дал определение концептуальной модели данных: «Концептуальная модель данных – это модель, которая описывает сущности (англ. entities) в предметной области, связи между ними, атрибуты этих сущностей и ограничения на данные» [22]. ER-модель позволяет описывать отношения между сущностями, такие как «один-к-одному», «один-ко-многим» и «многие-ко-многим», а также определять ограничения на данные, такие как «уникальность» и «необходимость».

На рис. 4 продемонстрирована концептуальная модель данных об извлечении ожиданий к качеству данных корпоративных хранилищ, разработанная на основе онтологической модели [19, 9]. Сущности концептуальной модели соответствуют классам онтологии, также на модели отражены соответствующие онтологии связи между сущностями. В соответствии с нотацией Р. Баркера, связи между сущностями описываются в «обе» стороны. Так, связь между сущностями «Ожидание качества данных - Относится - Термин» дополняется обратным описанием «Термин - Должен соответствовать - Ожидание качества данных».

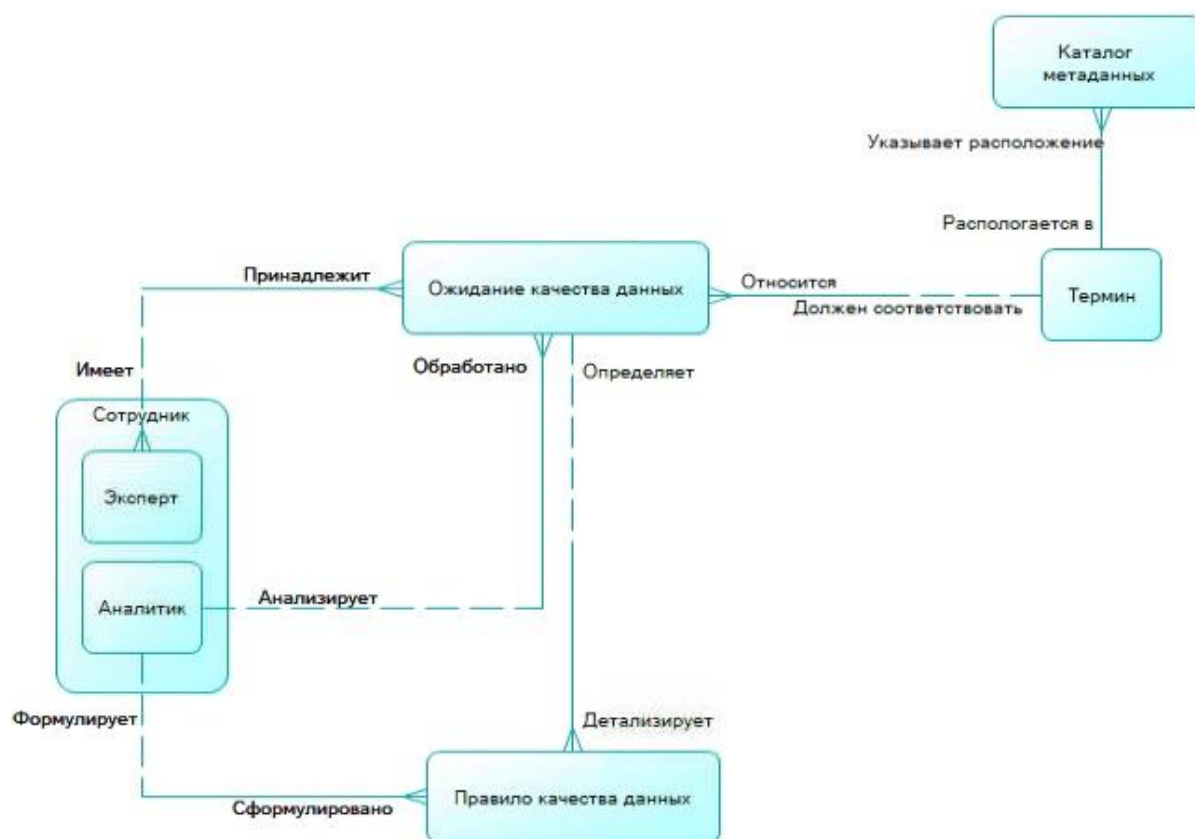


Рис. 4. Концептуальная модель данных об извлечении ожиданий к качеству данных корпоративных хранилищ

Fig. 4. Conceptual Data Model for Extracting Expectations for Enterprise Data Quality Data

Также на концептуальной модели данных графически отражены типы отношений между сущностями, такие как «один-к-одному» (англ. one-to-one), «один-ко-многим» (англ. one-to-many) и «многие-ко-многим» (англ. many-to-many) и обязательность связи между ними – непрерывная линия до середины связи при обязательной, пунктирная линия при необязательной.

На следующем этапе проводится разработка логической модели данных. Логическая модель данных дополняет концептуальную, переводя ее описание в форму, которая может быть использо-

вана для создания физической базы данных. Логическая модель данных описывает, как данные будут храниться и организовываться в базе данных, включая описание таблиц, полей и связей между таблицами по конкретным полям, которые будут использоваться в качестве первичных и внешних ключей. В целом, логическая модель данных является более детальной и конкретной, чем концептуальная модель данных, и представляет собой более точное описание того, как данные будут храниться и использоваться в базе данных.

На рис. 5 продемонстрирована логическая модель данных об извлечении ожиданий к качеству данных корпоративных хранилищ, разработанная на основе концептуальной модели. Модель дополнена атрибутами сущностей, которые будут описывать экземпляры кон-

кретной сущности. Также детализирована связь между сущностями путем выделения первичных и внешних ключей и устранена связь «многие-ко-многим» путем выделения сущности «Связь эксперта с ожиданием качества данных».

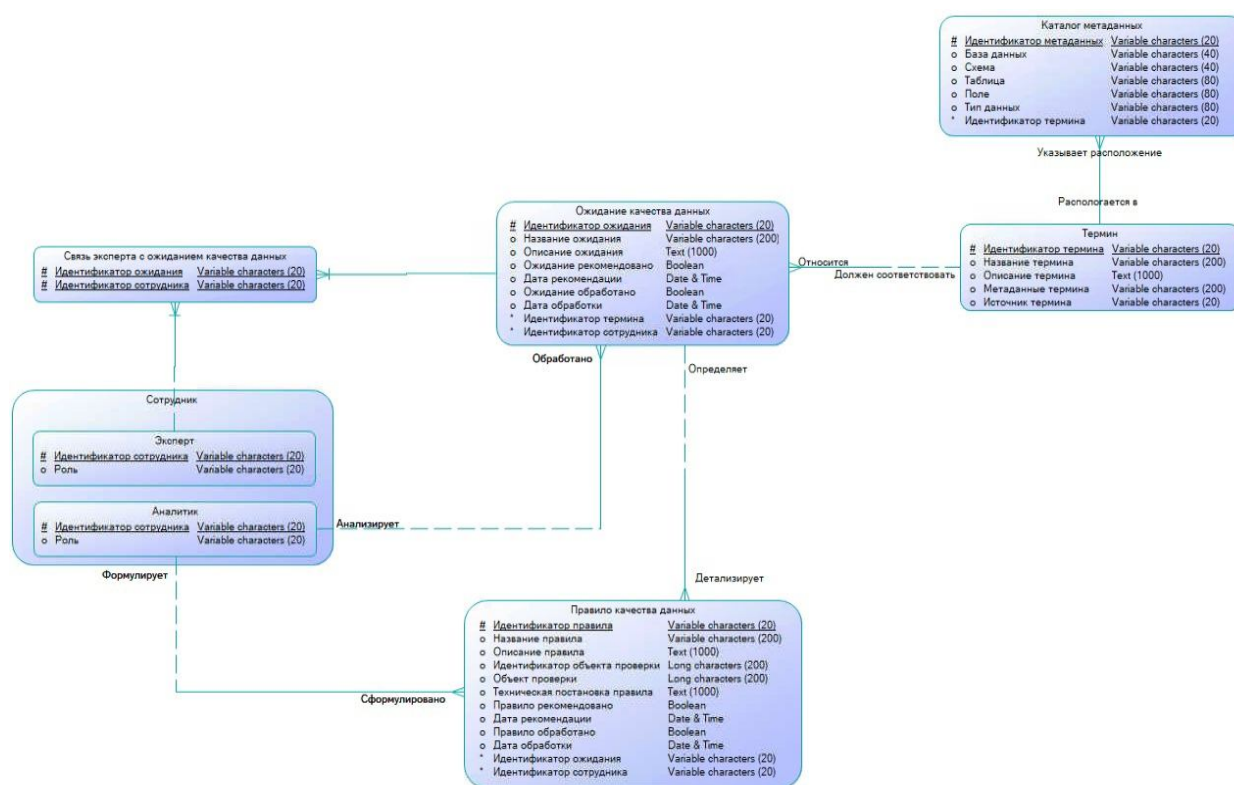


Рис. 5. Логическая модель данных об извлечении ожиданий к качеству данных корпоративных хранилищ

Fig. 5. Logical Data Model for Extracting Expectations for Enterprise Data Quality Data

Для данной модели не требуется дополнительная нормализация отношений, так как ее отношения уже находятся во второй нормальной форме: они находятся в первой нормальной форме и каждый их неключевой атрибут непри- водимо зависим от первичного ключа.

На следующем этапе проводится разработка физической модели данных. Физическая модель данных (рис. 6)

представляет собой перечень таблиц и полей в пригодном для реляционных баз данных виде [14].

Названия таблиц и полей переводятся на латиницу для генерации кода на языке SQL с целью создания таблиц и ограничений в базе данных. Полученная физическая модель позволяет создать служебную реляционную базу данных информационной системы из-

влечения и обработки ожиданий к качеству данных корпоративных хранилищ с сохранением онтологических связей между выделенными классами. Справедливо отметить, что необходимость иметь две таблицы “EXPERT” и “ANALYST” с одинаковым набором атрибутов кажется избыточной, однако это целесообразно из-за устранения связи «многие-ко-

многим» путем выделения сущности “EXPERT_DQ_REQUIREMENT”, так как на практическом опыте у ожидания к качеству данных может быть несколько заинтересованных экспертов, например, при использовании таких групповых методов извлечения знаний, как «круглый стол» или «мозговой штурм» [11].

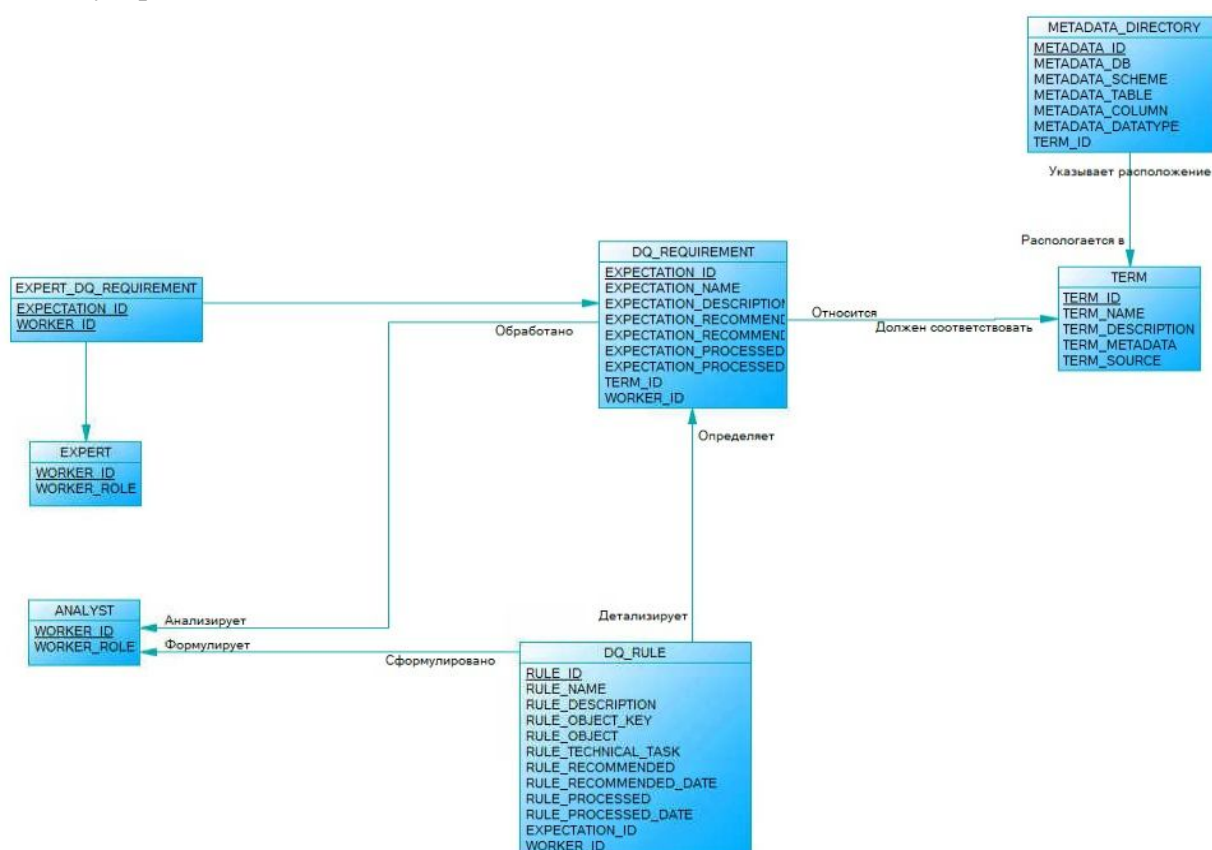


Рис. 6. Физическая модель данных об извлечении ожиданий к качеству данных корпоративных хранилищ

Fig. 6. Physical data model of extracting expectations for data quality of enterprise warehouses

Выводы

В ходе работы проведена формализация разработанной онтологической модели предметной области исследования с помощью реляционной модели данных и теории множеств. В процессе исследова-

ния утверждалось, что актуальным направлением совершенствования подходов к извлечению и обработке ожиданий к качеству данных является автоматизация активных индивидуальных и групповых методов извлечения знаний и использование MDM-, DG-систем. Для

дальнейших исследований в данном направлении актуальна реализация модели данных на основе онтологии исследуемой предметной области, что потребовало постановки соответствующей задачи, ее формализации и выполнения.

Каждый выделенный в онтологической модели класс рассмотрен в качестве множества кортежей, где каждый кортеж – экземпляр конкретного класса онтологической модели. В формализованном виде целью дальнейших исследований является наполнение множеств E , P элементами, соответствующим элементам множеств T , M , W с помощью разрабатываемых моделей и алгоритмов.

Таким образом, в процессе исследования удалось на основе разработанной ранее онтологической модели разработать концептуальную, логическую и физическую модель для реляционной базы данных. Обзор исследований отечественных и зарубежных ученых под-

твердил возможность подобного подхода. Применение онтологического подхода на раннем этапе исследования позволило определить исследуемый периметр предметной области для дальнейшей работы ввиду ее новизны, а переход к реляционной модели данных позволит повысить степень практической значимости исследования в целом и сделать его результаты более доступными для промышленной эксплуатации организациями, осуществляющими работы по созданию корпоративных хранилищ данных. В частности, достичь этого возможно за счет хранения экземпляров классов онтологии в реляционной базе данных, что позволит сделать взаимодействие с результатами исследования более доступным как для пользователей, так и для интеграции с необходимыми системами для получения данных об экземплярах, например, Бизнес-гlossариями и Каталогами метаданных.

Список литературы

1. Лучкин Н. А. Создание модели хранилища данных корпоративной информационно-аналитической системы предприятия // Объектные системы. 2011. №1 (3). С. 36–39.
2. Основные тренды цифровой трансформации экономики / под ред. д.э.н. Н.Н. Масюк. Владивосток: изд-во ВГУЭС, 2021. 200 с.
3. Салий В.В., Кухаренко Л.В., Ищенко О.В. Цифровая трансформация экономики и внедрение хранилищ данных на основе больших данных в инфраструктуру компании // Вестник Академии знаний. 2021. №3 (44). С. 208–214.
4. Ильин А. А. Некоторые проблемы построения корпоративных Хранилищ данных // Программные продукты и системы. 2005. № 3. С. 29-32.
5. Цифровая трансформация: ожидания и реальность / Г. И. Абдрахманова, С. А. Васильковский, К. О. Вишневский, М. А. Гершман, Л. М. Гохберг; рук. авт. кол. Рудник П. Б. [и др.] // докл. к XXIII Ясинской (Апрельской) междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2022. 221 с.

6. DAMA-DMBOK: Свод знаний по управлению данными. 2-е изд. М.: Олимп–Бизнес, 2020. 828 с.
7. Модели представления и обработки знаний в информационно-аналитических системах / В. П. Добрица, Е. А. Титенко, Ю. А. Халин, А. И. Катыхин. Курск, 2023. 172 с.
8. Загорюлько Ю. А. Современные средства формализации семантики областей знаний на основе онтологий // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. №3 (11). С. 27–35.
9. Когнитивное моделирование информационного обеспечения игрового автоматизированного обучения / Халин Ю.А., Катыхин А.И., Зинкин С.А., Шилин А.А. // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022. Т. 26, №4. С. 117-131. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-117-131>.
10. Gruber T.R. A translational approach to portable ontology specification // Knowledge Acquisition. 1993. Vol. 5. № 2. Pp. 199-220.
11. Афанасьев А.А., Кудинов В.А. Исследование подходов к моделированию данных на основе онтологии предметной области качества данных корпоративных хранилищ // Интеллектуальные информационные системы: Теория и практика: сб. науч.ст. по материалам IV Всерос. с междунар. участием конф. / отв. ред. А.А. Халин. Курск, 2023. С. 188-200.
12. Khan S. A., Qadir M. A. A Genaric Framework for Evaluation of Ontology to Relational Database Transformation Process // 2010 International Conference on Information and Emerging Technologies (ICIET). Karachi, 2010. pp. 1-5.
13. Афанасьев А.А., Кудинов В.А. Использование онтологического подхода для извлечения ожиданий к качеству данных корпоративных хранилищ // Экономика. Информатика. 2022. № 49(3). С. 566–574. <https://doi.org/10.52575/2687-0932-2022-49-3-566-574>.
14. Olivier Curé, Guillaume Blin. RDF Database Systems. Morgan Kaufmann, 2014. 256 с.
15. Yongqi Huang, Gaoyan Deng. Research on Storage of Geo-ontology in Relational Database // 2nd International Symposium on Information Engineering and Electronic Commerce (IEEC). Ternopil, 2010. Pp. 1-4.
16. Ahmed W., Aslam M. A., Jun Shen, Jianming Yong. A Light Weight Approach for Ontology Generation and Change Synchronization between Ontologies and Source Relational Databases // 15th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD). Lausanne, 2011. pp. 208-214.
17. Онтологии и базы данных - взаимная дополнительность при использовании научных данных / А. О. Еркимбаев, В. Ю. Зицерман, Г. А. Кобзев, А. В. Косинов // Мониторинг. наука и технологии. Центр сопряженного мониторинга окружающей среды и природных ресурсов. 2015. №3 (24). С. 41-50.

18. Вехорев М. Н., Пантелеев М. Г. Построение хранилищ онтологических баз знаний // Программные продукты и системы. 2011. №3. С. 1-6.
19. Олейник П. П., Грегер С. Э. Применение и реализация онтологий при разработке приложений баз данных // Прикладная информатика. 2016. №3 (63). С. 76-102.
20. Автоматизация разработки онтологий научных предметных областей на основе паттернов онтологического проектирования / Ю. А. Загорулько, Е. А. Сидорова, Г. Б. Загорулько, И. Р. Ахмадеева, А. С. Серый // Онтология проектирования. 2021. №4 (42). С. 500–520.
21. Codd E. F. A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks // Communications of the ACM. 1970. Vol. 13 (6). P. 377–387.
22. Chen P. P.-S. The Entity-Relationship Model: Toward a Unified View of Data // ACM Transactions on Database Systems. 1976. Vol. 1 (1). Pp. 9–36.

References

1. Luchkin N. A. Creating a data warehouse model for a corporate information and analytical system of an enterprise. *Ob'ektnye sistemy = Object Systems*. 2011; 1 (3): 36-39. (In Russ.)
2. Masyuk N.N. Main trends in the digital transformation of the economy. Vladivostok, izd-vo VGUES; 2021. 200 p. (In Russ.)
3. Saliy V.V., Kukharenko L.V., Ishchenko O.V. Digital transformation of the economy and the introduction of data warehouses based on big data into the company's infrastructure. *Vestnik Akademii znaniy = Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2021; (3): 208-214. (In Russ.)
4. Ilyin A. A. Some problems in building corporate data warehouses. *Programmnye produkty i sistemy = Software Products and Systems*. 2005; 3: 29-32. (In Russ.)
5. Abdrakhmanova G. I., Vasilkovsky S. A., Vishnevsky K. O., Gershman M. A., Gokhberg L. M. [et al.], hands auto count Rudnik P. B. Digital transformation: expectations and reality. In: *XXIII Yasinskoy (Aprel'skoy) mezhdunar. nauch. konf. po problemam razvitiya ekonomiki i obshchestva = XXIII Yasinsk (April) international. scientific conf. on problems of economic and social development*. Moscow: Izd. dom Vysshei shkoly ekonomiki; 2022. 221 p. (In Russ.)
6. DAMA-DMBOK: Data Management Body of Knowledge. 2nd ed.]. Moscow: Olimp-Business; 2020. 828 p. (In Russ.)
7. Dobritsa V. P., Titenko E. A., Khalin Y. A., Katykhin A. I. Models of knowledge representation and processing in information-analytical systems. Kursk, 2023. 172 p. (In Russ.)
8. Zagorulko Yu. A. Modern means of formalizing the semantics of knowledge areas based on ontologies. *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management*. 2018; (3): 27-35. (In Russ.)

9. Khalin Y. A., Katykhin A. I., Zinkin S. A., Shilin A. A. Cognitive Modeling of Information Support for Game-Based Automated Learning. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(4): 117-131 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-117-131>.
10. Gruber T.R. A translational approach to portable ontology specification. *Knowledge Acquisition*. 1993; 5 (2): 199-220.
11. Afanasyev A.A., Kudinov V.A. Research of approaches to data modeling based on the ontology of the data quality domain of corporate storages. In: *Intellectual'nye informacionnye sistemy: Teoriya i praktika: sb. nauch.st. po materialam IV Vseros. s mezhdunar. uchastiem konf. = Intelligent information systems: Theory and practice: collection. scientific article based on materials of the IV All-Russian. with international participation of the conf.* Kursk; 2023. P. 188-200. (In Russ.)
12. Khan S. A., Qadir M. A. A Genaric Framework for Evaluation of Ontology to Relational Database Transformation Process. *2010 International Conference on Information and Emerging Technologies (ICIET)*. Karachi, 2010. P. 1-5.
13. Afanasyev A.A., Kudinov V.A. Using an Ontology Approach to Extract Quality Expectations for Enterprise Data Warehouses. *Ekonomika. Informatika = Economy. Computer Science*. 2022; 49(3): 566–574. (In Russ.).
14. Olivier Curé, Guillaume Blin. *RDF Database Systems*. Morgan Kaufmann, 2014, 256 p.
15. Yongqi Huang, Gaoyan Deng. Research on Storage of Geo-ontology in Relational Database. *2nd International Symposium on Information Engineering and Electronic Commerce (IEEC)*. Ternopil, 2010. P. 1-4.
16. Ahmed W., Aslam M. A., Jun Shen, Jianming Yong. A Light Weight Approach for Ontology Generation and Change Synchronization between Ontologies and Source Relational Databases. *15th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*. Lausanne, 2011. P. 208-214.
17. Erkimbaev A. O., Zitserman V. Yu., Kobzev G. A., Kosinov A. V. Ontologies and databases - mutual complementarity when using scientific data. *Monitoring. nauka i tekhnologii = Monitoring. Science and technology. Center for Associated Monitoring of the Environment and Natural Resources*, 2015; (3): 41-50. (In Russ.)
18. Vekhorev M. N., Panteleev M. G. Construction of repositories of ontological knowledge bases. *Programmnye produkty i sistemy = Software Products and Systems*. 2011; (3): 1-6. (In Russ.)
19. Oleinik P. P., Greger S. E. Application and implementation of ontologies in the development of database applications. *Prikladnaya informatika = Applied informatics*. 2016; (3): 76-102. (In Russ.)

20. Zagorulko Yu. A., Sidorova E. A., Zagorulko G. B., Akhmadeeva I. R., Sery A. S. Automation of the development of ontologies of scientific subject areas based on ontological design patterns. *Ontologiya proektirovaniya = Ontology of Design*. 2021; (4): 500-520. (In Russ.)

21. Codd E. F. A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks. *Communications of the ACM*. 1970; 13 (6): 377–387.

22. Chen P. P.-S. The Entity-Relationship Model: Toward a Unified View of Data. *ACM Transactions on Database Systems*. 1976; 1 (1): 9–36.

Информация об авторах / Information about the Authors

Халин Юрий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: yur-khalin@yandex.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7020-8515>

Yuri A. Khalin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: yur-khalin@yandex.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7020-8515>

Афанасьев Александр Александрович, аспирант, Курский государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: afanasyevkursk@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0009-0002-5862-2059>.

Alexander A. Afanasyev, Post-Graduate Student, Kursk State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: afanasyevkursk@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0009-0002-5862-2059>.

Кудинов Виталий Алексеевич, доктор педагогических наук, профессор, профессор кафедры программного обеспечения и администрирования информационных систем, Курский государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kudinovva@yandex.ru, ORCID <https://orcid.org/0009-0008-7623-5494>.

Vitaly A. Kudinov, Dr. of Sci. (Pedagogy), Professor, Professor of the Software and Information Systems Administration Department, Kursk State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kudinovva@yandex.ru, ORCID <https://orcid.org/0009-0008-7623-5494>.

УДК 681.391

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-134-147>

Коррекция ошибок в ВЗУ ЭВМ с использованием STAIRCASE-кодов

С.И. Егоров¹ ✉, Ю.С. Киряев¹, Е.И. Локтионов¹, В.С. Титов¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: sie58@mail.ru

Резюме

Целью исследования является применение недвоичных staircase-кодов для коррекции ошибок, возникающих в каналах чтения внешних запоминающих устройств (ВЗУ) ЭВМ.

Методы. Декодирование staircase-кодов реализуется путем декодирования слов компонентных кодов Рида-Соломона, расположенных в паре соседних блоков, в окне декодирования. Декодирование слов компонентных кодов в окне выполняется параллельно, что уменьшает задержку staircase-декодера. Для решения ключевого уравнения при декодировании слов кода Рида-Соломона предлагается использовать алгоритм ePIBMA (Enhanced Parallel Inversionless B-M Algorithm).

Результаты. В результате исследования были выбраны параметры staircase-декодера, оптимизирующие его работу. Эффективность staircase-кодов в каналах чтения ВЗУ ЭВМ исследовалась с помощью компьютерного моделирования. В качестве показателя эффективности использовалась доля блоков с неисправимыми ошибками. Для учета группирования ошибок, характерного для дисковых накопителей ВЗУ, в качестве модели канала использовался двоичный симметричный канал с памятью (ДСКП), который описывался модифицированной моделью Беннета-Фройлиха. Параметр геометрического распределения g этой модели принимался равным 0,2, 0,5 и 0,9. Исследовался staircase-код с компонентными кодами Рида-Соломона (224, 210, 15), определенными над полем $GF(2^8)$. При этом скорость этого staircase-кода равна $R = 0,87$, что соответствует скорости производства кодов Рида-Соломона, используемого в оптических дисках DVD.

Заключение В представленной работе предлагается для коррекции ошибок в ВЗУ ЭВМ с секторной организацией использовать staircase-коды с компонентными кодами Рида-Соломона. Рассмотрено декодирование этих кодов с использованием алгоритма ePIBMA. Результаты исследования показали более высокую эффективность staircase-кодов в каналах с группированием ошибок по сравнению с производением кодов Рида-Соломона с такой же избыточностью.

Ключевые слова: коррекция ошибок; внешние запоминающие устройства; staircase-коды; декодирование; имитационное моделирование; коды Рида-Соломона

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Коррекция ошибок в ВЗУ ЭВМ с использованием STAIRCASE-кодов / С.И. Егоров, Ю.С. Киряев, Е.И. Локтионов., В.С. Титов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №2. С. 134-147. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-134-147>.

Поступила в редакцию 12.01.2024

Подписана в печать 20.03.2024

Опубликована 25.06.2024

© Егоров С.И., Киряев Ю.С., Локтионов Е.И., Титов В.С., 2024

Error correction in the computer storage using staircase codes

Sergey I. Egorov ¹ ✉, Yuriy S. Kiryaev ¹, Evgeniy I. Loktionov ¹, Vitaliy S. Titov ¹

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: sie58@mail.ru

Abstract

Purpose of research is to use non-binary staircase codes to correct errors that occur in the reading channels of external storage devices (ESD) of a computer.

Methods. Decoding of staircase codes is implemented by decoding words of component Reed-Solomon codes located in a pair of adjacent blocks in the decoding window. After decoding all the words of component codes, the data blocks in the window are shifted. Decoding of component code words in a window is performed in parallel, which reduces the delay of the staircase decoder. The procedure for decoding component Reed-Solomon codes involves the sequential execution of the following steps: 1) the syndrome polynomial is calculated; 2) polynomials of locators and error values are calculated (the key equation is solved); 3) the roots of the polynomial of error locators are sought; 4) error values are calculated; 5) erroneous symbols are corrected. To solve the key equation (step 2), it is proposed to use the ePIBMA (Enhanced Parallel Inversionless B-M Algorithm) algorithm.

Results. As a result of the study using computer simulation, the parameters of the staircase decoder were selected to optimize its operation: the number of half-iterations is 3; the decoding window size is 8 blocks; decoding delay is 6 blocks. For these parameters, the correction ability of the staircase decoder is close to maximum, with moderate complexity and latency. The effectiveness of staircase codes in the reading channels of the computer's ESD was studied using computer simulation. The percentage of blocks with uncorrectable errors was used as an indicator of efficiency. To take into account the grouping of errors symbols of ESD disk drives, a binary symmetric channel with memory (BSMC), which was described by a modified Bennett-Froelich model, was used as a channel model. The geometric distribution parameter g of this model was taken equal to 0.2, 0.5 and 0.9. A staircase code with component Reed-Solomon codes (224, 210, 15) defined over the GF(28) field was studied. Moreover, the speed of this staircase code is $R = 0.87$, which corresponds to the speed of the product of Reed-Solomon codes used in DVD optical discs. It is shown that when using code constructions with the same speed, the ratio of blocks with uncorrectable errors is smaller in the staircase code compared to the product of Reed-Solomon codes and that with increasing average error packet length this ratio decreases.

Conclusion. In the presented paper, it is proposed to use staircase codes with component Reed-Solomon codes to correct errors in the ESD of a computer with a sector organization. Decoding of these codes using the ePIBMA algorithm is considered. Using simulation, the parameters of the staircase code decoder were selected. The efficiency of error correction in channels with error grouping has been studied. The results of the study showed higher efficiency of staircase codes in channels with error grouping compared to a product of Reed-Solomon codes with the same redundancy.

Keywords: error correction; external storage devices; staircase-codes; decoding; simulation; Reed-Solomon codes

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Egorov S. I., Kiryaev Y. S., Loktionov I. E., Titov V. S. Error correction in the computer storage using staircase codes. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(2): 134-147 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-134-147>.

Received 12.01.2024

Accepted 20.03.2024

Published 25.06.2024

Введение

Важным компонентом ЭВМ является внешнее запоминающее устройство (ВЗУ). В настоящее время в ЭВМ в основном используются ВЗУ с прямым доступом. Секторная организация данных такого ВЗУ обеспечивает возможность чтения данных с минимальной задержкой. Примерами ВЗУ с прямым доступом являются накопители на магнитных и оптических дисках, а также энергонезависимая флеш-память.

Хранение информации на современных носителях с высокой плотностью записи требует для обеспечения высокой надежности применения помехоустойчивого кодирования. Основной причиной ошибок чтения секторов ВЗУ являются дефекты носителя, обуславливающие пакетный характер ошибок [1]. Группирующиеся ошибки эффективно исправляются помехоустойчивыми кодами Рида-Соломона и основанными на них кодовыми конструкциями [2-4].

В частности, для коррекции ошибок в оптических дисках DVD используется произведение кодов Рида-Соломона [2,3], для коррекции ошибок в оптических дисках BD используется пикет-код [4], представляющий собой совокупность перемеженных слов кодов Рида-Соломона.

В данной работе рассматривается применение для коррекции ошибок в последовательности секторов данных недвоичных staircase-кодов [5-10], ис-

пользующих в качестве компонентных кодов коды Рида-Соломона.

Материалы и методы

Staircase-коды или «лестничные коды» получили своё название благодаря визуализации данной кодовой конструкции, так как последовательность ее блоков удобно изображать в виде лестницы (лестница на английском языке - staircase) (рис. 1). При этом последовательности символов в строке одного блока и столбце следующего (повернутого) блока являются кодовыми словами компонентного кода. Все горизонтальные и вертикальные последовательности символов в любой паре соседних блоков в «лестнице» являются кодовыми словами.

Размерность m квадратного блока B_i в staircase-коде равна половине длины компонентного кода n (см. рис. 1).

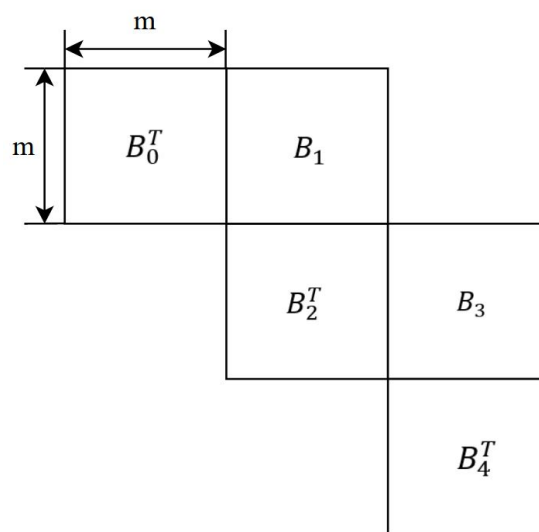


Рис. 1. Фрагмент staircase кода

Fig. 1. Staircase-code fragment

Характеристики staircase-кодов определяются параметрами компонентных кодов. Используемые в качестве двоичных компонентных кодов коды Рида-Соломона имеют следующие параметры [11]:

n – длина кодового слова, $n = 2m$;

k – количество информационных символов в слове;

r – скорость кода, $r = k/n$;

d – минимальное кодовое расстояние кода;

t – максимальное число гарантированно исправляемых ошибок в кодовом слове, $t = \lfloor (d-1)/2 \rfloor$;

q – порядок конечного поля Галуа $GF(q)$, над которым определен код.

Тогда размер блока данных в битах N равен:

$$N = qm^2 = qn^2 / 4 ,$$

количество информационных бит в блоке данных равно:

$$\begin{aligned} K &= qm(m - (n - k)) = \\ &= q(n/2)(n/2 - n + k) = \\ &= qn(k - n/2) / 2 \end{aligned}$$

и скорость staircase-кода определяется следующим выражением:

$$R = (2k / n - 1) = 2r - 1 .$$

Реализации кодеров и декодеров staircase-кодов с компонентными двоичными БЧХ-кодами рассмотрены в [12, 13].

Ниже мы рассмотрим реализацию декодера staircase-кодов с компонентными кодами Рида-Соломона.

При наличии жестких ограничений на потребляемую мощность и задержку

декодера используют декодирование с жесткими решениями.

Декодирование staircase-кодов реализуется путем декодирования слов компонентных РС-кодов, расположенных в паре соседних блоков, в окне декодирования. После декодирования всех слов компонентных кодов блоки данные в окне сдвигаются. Псевдокод процедуры декодирования в окне представлен ниже.

1. Чтение блока из окна
2. Запись блока в окно
3. $j = 1$
4. Декодирование компонентных кодов Рида-Соломона
5. $j = j + 1$
6. Если $j < hit_num$, переход к п. 4, иначе Конец

Окно декодирования реализуется с помощью циклического буфера, в котором хранятся блоки данных. Сначала из окна читается блок данных с исправленными ошибками, затем на его место записывается блок данных, принятых из канала. После чего над словами компонентных кодов из блоков данных, хранящихся в окне, выполняется заданное число полуитераций декодирования (hit_num).

Для декодирования компонентных кодов в окне возможны следующие три расписания:

– декодирование кодовых слов, извлекаемых из блоков по цепочке, последовательно, начиная с вновь поступившего блока;

– декодирование кодовых слов, извлекаемых из блоков по цепочке, по-

следовательно, начиная с блока, чья обработка завершается;

– декодирование всех доступных кодовых слов в окне параллельно, на одной полуитерации – всех горизонтальных, на другой – всех вертикальных.

Для реализации декодирования Staircase-кодов с меньшей задержкой целесообразно использовать в окне параллельное расписание.

Пример окна, в котором происходит декодирование, приведен на рис. 2.

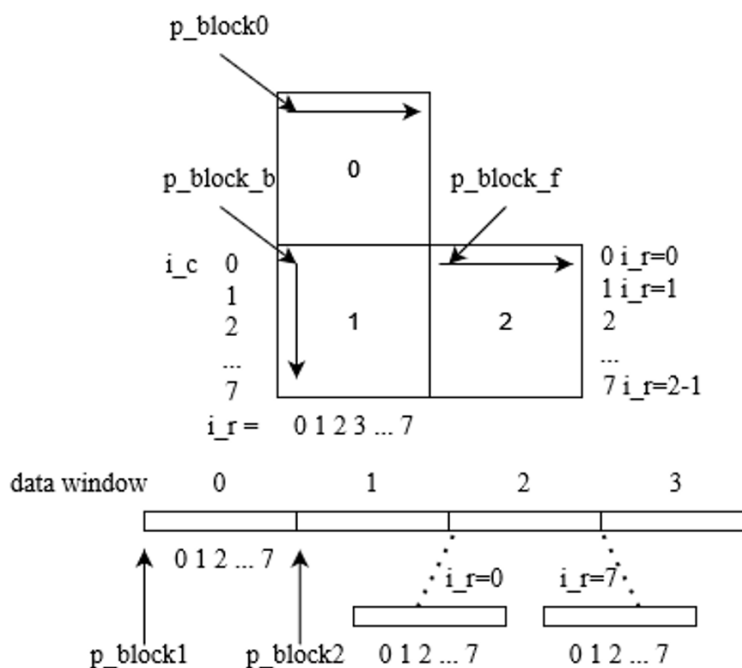


Рис. 2. Пример окна декодирования

Fig. 2. Example of decoding windows

Процедура декодирования компонентных кодов предполагает выполнение следующих шагов:

1. Вычисляется полином синдрома $S(x)$ для принятого слова $r(x)$.
2. Вычисляются полиномы локаторов и значений ошибок $\Lambda(x)$ и $B(x)$ ($\Omega(x)$).

Окно имеет размер, равный 4 блокам, $m = 8, n = 16$.

На рис. 2 используются следующие обозначения: i_r – номер строки в паре блоков (номер кодового слова РС-кода), i_c – номер столбца в паре блоков (номер символа в кодовом слове РС-кода), p_block_b , p_block_f – указатели на декодируемые блоки. Указатели показывают на начало блоков, кодовые слова которых декодируются.

3. Ищутся корни многочлена $\Lambda(x)$. Если число допустимых корней равно степени $\Lambda(x)$, то их обратные значения являются локаторами ошибок. В противном случае кодовое слово является не декодируемым.

4. Вычисляются значения ошибок по методу Форни или Хоригучи-Кеттера, получается полином ошибок $e(x)$.

5. Ошибочные символы исправляются.

Наиболее сложным является шаг 2, предусматривающий решение ключевого полиномиального уравнения $S(x) = \Lambda(x)\Omega(x) \bmod x^{d-1}$. Несколько методов решения ключевого уравнения рассмотрены в [14]. Однако приведенные в [14] алгоритмы не ориентированы на аппаратную реализацию.

В статье предлагается для решения ключевого уравнения использовать алгоритм ePIBMA (Enhanced Parallel Inversionless B-M Algorithm) [15, 16]. Псевдокод алгоритма приведен ниже.

Вход –полином синдрома $S(x)$ степени $2t - 1$.

1. Инициализация:

$$r = 0, \Theta(x) = S_0 + S_1x + \dots + S_{2t-2}x^{2t-2} + x^{2t}, \\ \Omega(x) = S_0 + S_1x + \dots + S_{2t-2}x^{2t-2} + S_{2t-1}x^{2t-1} + x^{2t}, \\ \gamma = 1, L_\Lambda = L_B = 0.$$

2. Вычисляем невязку

$$\Omega^{(r+1)}(x) = \gamma * [\zeta_1 \Omega^{(r)}(x) - \Omega^{(r)}(x) * \Theta^{(r)}(x)]$$

Если $(\Omega^{(r)})_0 \neq 0$ и $L_\Lambda \leq L_B$, тогда

$$\Theta^{(r+1)}(x) = [\zeta_1 \Theta^{(r)}(x)] L_\Lambda = L_B + 1, L_B = L_\Lambda \\ \gamma = \Omega^{(r)}_0.$$

Иначе

$$\text{Если } (L_B = t-1), \text{ тогда } \Theta^{(r+1)}(x) = [\zeta_1 \Theta^{(r)}(x)]$$

$$\text{Иначе } \Theta^{(r+1)}(x) = \Theta^{(r)}(x), L_B = L_B + 1$$

$$\Theta^{(r+1)}_{2t-r-2} = 0.$$

3. Меняем $r \leftarrow r + 1$. Если $r < 2t$, возвращаемся к шагу 2.

4. Возвращаем полином локаторов ошибок $\Lambda = [\Omega^{(2t)}_0, \Omega^{(2t)}_1, \dots, \Omega^{(2t)}_t]$ и вспомогательный полином $B = [\Theta^{(2t)}_0, \Theta^{(2t)}_1, \dots, \Theta^{(2t)}_{t-1}]$.

В данном алгоритме вычисление невязки и полиномиальные обновления выполняются одновременно. Благодаря этому достигается малое значение критического пути при его аппаратной реализации, тем самым обеспечивается высокое быстродействие.

Структурная схема декодера компонентного кода Рида-Соломона приведена на рис. 3.

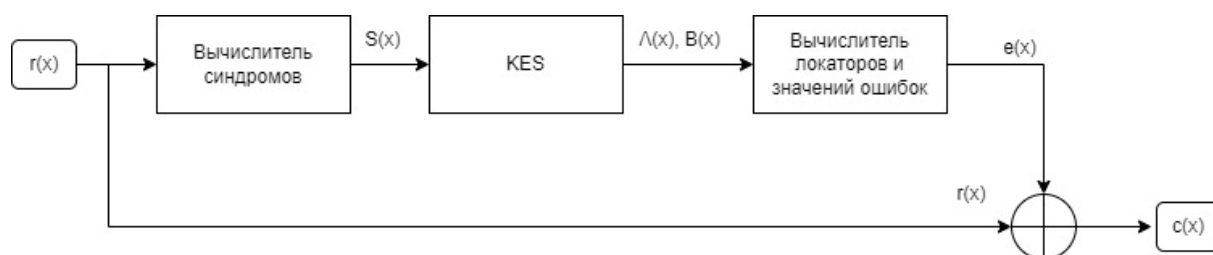


Рис. 3. Структурная схема декодера компонентного кода Рида-Соломона

Fig. 3. Block diagram of the decoder of component Reed-Solomon code

Блок KES (Key Equation Solver) отвечает за решение ключевого уравнения.

Результаты и их обсуждение

Качество коррекции ошибок для заданного Staircase-кода зависит от сле-

дующих параметров декодера: размера окна декодирования (win_size), задержки декодирования (lat) и числа полуитераций (hit_num).

Качество коррекции ошибок в зависимости от перечисленных параметров

исследовалось на программной модели. Структурная схема программной модели приведена на рис. 4.

Программная модель выполняет: генерацию данных, кодирование (кодер RSSC), внесение канального шума (используется АБГШ - Аддитивный белый Гауссовский шум или двоичные пакеты ошибок), декодирование (декодер RSSC) и сравнение исправленных блоков дан-

ных с исходными для вычисления $BIER$ (коэффициента блоковых ошибок).

Оценки качества коррекции ошибок для staircase-кода с компонентными кодами Рида-Соломона (224,218,7) над полем $GF(2^8)$ с различными параметрами декодера в виде зависимости $BIER$ от E_b/N_0 (отношения битовой энергии к спектральной плотности шума), полученные с помощью программной модели, приведены на рис. 5 - 7.

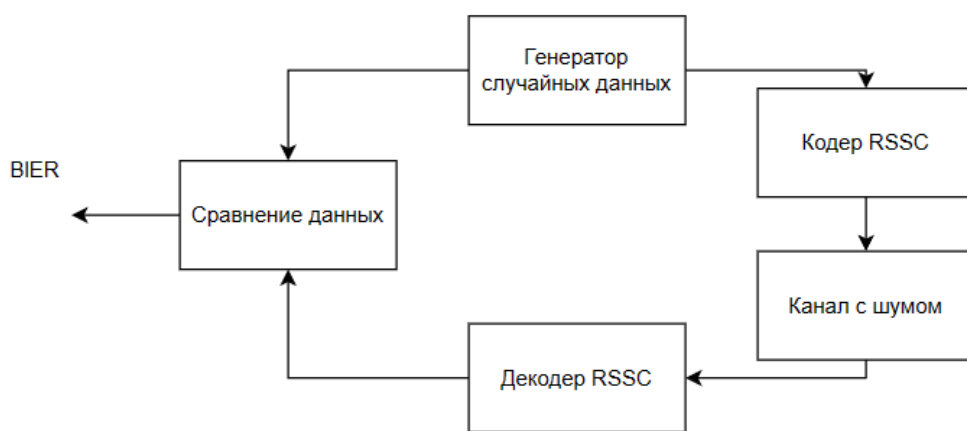


Рис. 4. Структурная схема программной модели

Fig. 4. Block diagram of program model

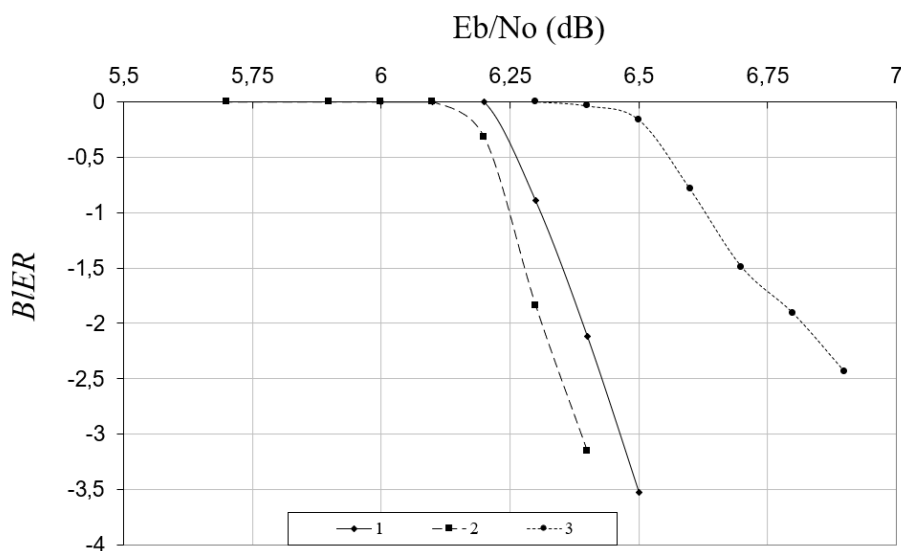


Рис. 5. Зависимость качества коррекции ошибок от числа полуитераций

Fig. 5. Performance for different halfiteration numbers

График зависимости качества коррекции ошибок от числа полуитераций (рис. 5) был построен для значений $\text{win_size} = 8$, $\text{lat} = 3$. Кривые, обозначенные цифрами 3, 1, 2, соответствуют числу полуитераций (hit_num), равному 1, 3, 5, соответственно.

График зависимости качества коррекции ошибок от задержки декодирования (рис. 6) был построен для значений $\text{win_size} = 8$, $\text{hit_num} = 3$. Кривые, обозначенные цифрами 1, 2, 3, соответствуют значению задержки (lat), равному 3, 6, 8, соответственно.

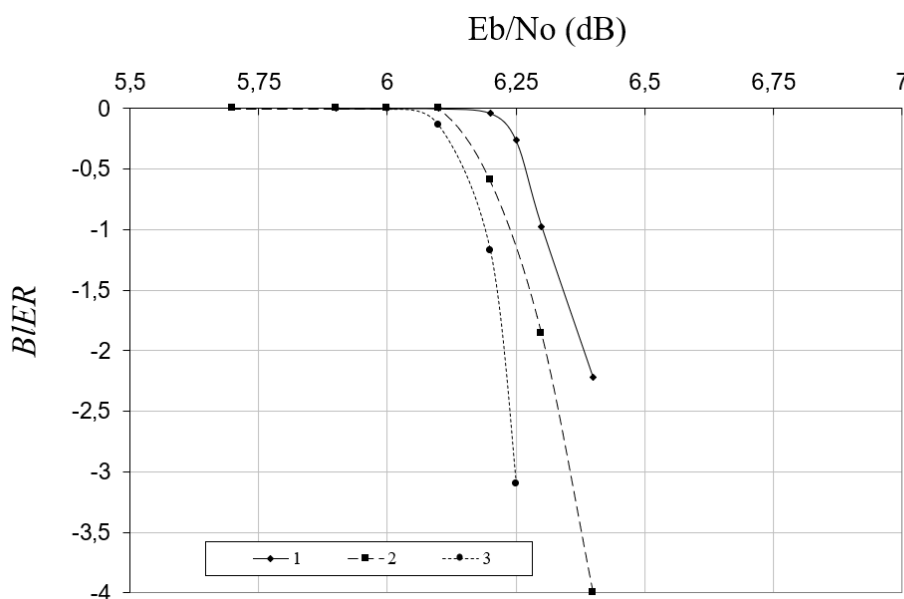


Рис. 6. Зависимость качества коррекции ошибок от задержки декодирования

Fig. 6. Performance for different decoding latencies

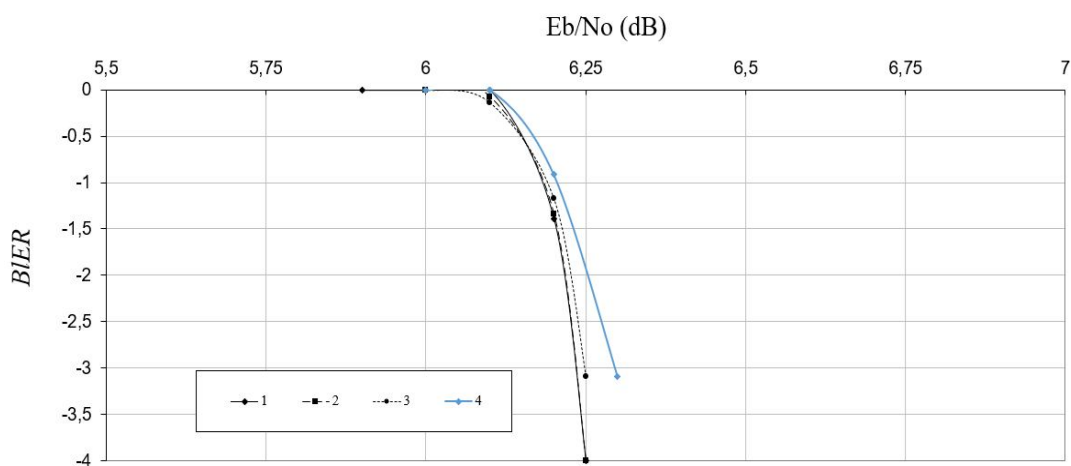


Рис. 7. Зависимость качества коррекции ошибок от размера окна

Fig. 7. Performance for different decoding windows

График зависимости качества коррекции ошибок от размера окна (рис. 7) был построен для значений $hit_num = 3$. Кривые, обозначенные цифрами 1, 2, 3, 4, соответствуют размеру окна (win_size), равному 12, 10, 8, 6, соответственно. При этом $lat = win_size$.

В результате исследования было установлено следующее. Число полуитераций $hit_num = 3$ будет оптимальным, так как дальнейшее увеличение числа полуитераций не дает существенного выигрыша корректирующей способности, а сложность декодирования увеличивается. Размер окна $win_size = 8$ будет оптимальным, так как дальнейшее увеличение размера не дает существенного выигрыша. Качество коррекции возрастает при приближении значения задержки к размеру окна. С учетом ограничений на задержку целесообразно выбрать ее значение равное 6, при этом корректирующая способность будет близка к максимальной.

Таким образом, для исследованного staircase-кода можно рекомендовать следующие параметры декодера: $hit_num = 3$, $win_size = 8$, $lat = 6$.

Эффективность staircase-кодов в каналах чтения ВЗУ ЭВМ исследовалась с помощью компьютерного моделирования. Для учета группирования ошибок, характерного для дисковых накопителей ВЗУ, в качестве модели канала использовался двоичный симметричный канал с памятью (ДСКП).

ДСКП описывался модифицированной моделью Беннета-Фройлиха [17], ко-

торая задавалась параметрами P_{be} и l_{av} (P_{be} – вероятность ошибки на бит, l_{av} – средняя длина пакета ошибок). Вместо l_{av} можно использовать параметр геометрического распределения g , связанный с l_{av} следующим отношением $l_{av} \cdot (1 - g) = 1$.

Исследовался staircase-код с комбинентными кодами Рида-Соломона (224, 210, 15), определенными на поле GF(28). При этом скорость этого staircase-кода равна $R = 0,87$, что соответствует скорости произведения кодов Рида-Соломона, используемого в оптических дисках DVD [18].

С использованием программной модели были получены зависимости $BIER$ на выходе RSSC-декодера от значения P_{be} для трёх различных значений параметра g . Результаты исследований приведены на рис. 8.

На графике цифры 1 - 3 соответствуют коррекции ошибок исследуемым staircase-кодом, цифры 4 - 6 – коррекции ошибок произведением кодов для DVD, причем цифры 1, 4 соответствуют значению $g = 0,2$, цифры 2, 5 – $g = 0,5$ и цифры 3, 6 – $g = 0,9$. Значения $BIER$ для произведения кодов взяты из работы [18].

Из рис. 8 видно, что при использовании кодовых конструкций с одной и той же скоростью исправляющая способность выше у staircase-кодом по сравнению с произведением кодов.

Из приведенного графика следует, что при увеличении средней длины пакета ошибок увеличивается и эффективность коррекции ошибок.

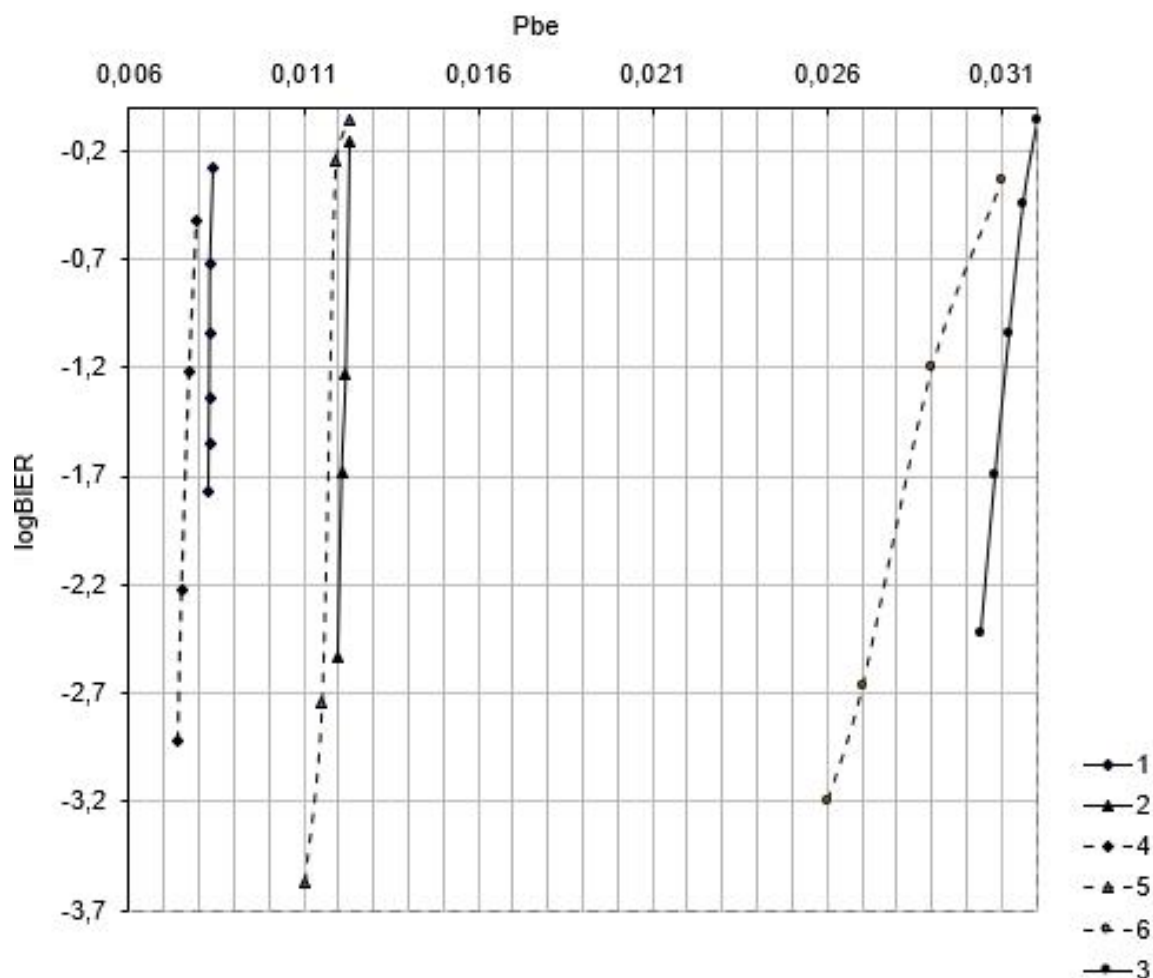


Рис. 8. Эффективность коррекции ошибок при различной степени их группирования

Fig. 8. Performance at different values of their grouping

Дальнейшее увеличение эффективности коррекции ошибок staircase-кодами с компонентными кодами Рида-Соломона возможно путем декодирования РС-кодов за границей половины минимального кодового расстояния [19, 20] или их мягкого декодирования¹ [21].

Выводы

В представленной работе предлагается для коррекции ошибок в ВЗУ ЭВМ

с секторной организацией использовать staircase-коды с компонентными кодами Рида-Соломона. Рассмотрено декодирование этих кодов с использованием алгоритма ePBMА. С помощью имитационного моделирования выбраны параметры декодера staircase-кода. Исследована эффективность коррекции ошибок в каналах с группированием ошибок. Результаты исследования показали более высокую эффективность staircase-кодов в каналах с группированием ошибок по сравнению с произведением кодов Рида-Соломона с такой же избыточностью.

¹ Патент N 2541869 Российская Федерация, МПК H03M 13/45. Устройство декодирования кодов Рида - Соломона / Егоров С.И., Графов О.Б. заявл. 10.10.2013; опубли. 20.02.2015, Бюл. №5.

Список литературы

1. Егоров С.И. Коррекция ошибок в информационных каналах периферийных устройств ЭВМ. Курск, 2008. 252 с.
2. Егоров С.И., Кривонос А.В., Титов В.С. Алгоритмы коррекции ошибок для оптических дисков DVD // Новые информационные технологии и системы: сб. науч. ст. XI Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 25-27 ноября 2014 г.). Пенза: Изд-во ПГУ, 2014. С. 128-133.
3. Егоров С.И., Кривонос А.В. Устройство коррекции ошибок для оптической памяти массового применения // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 6(75). С. 22-31.
4. Егоров С.И., Егорова М.С. Применение пикет-кодов в каналах передачи и воспроизведения информации // Телекоммуникации. 2023. №4. С. 9-15.
5. Smith B.P., Farhood A., Hunt A., Kschischang F.R, Lodge J. Staircase Codes: FEC for 100 Gb/s OTN // Journal of Lightwave Technology. 2012. Vol. 30, no. 1. P. 110–117.
6. Zhang L.M., Kschischang F.R. Staircase Codes With 6% to 33% Overhead // Journal of Lightwave Technology. 2014. Vol. 32, no. 10. P.1999–2002.
7. Y. Cai Y., et al. Fpga investigation on error-flare performance of a concatenated staircase and hamming fec code for 400g interdata center interconnect // Journal of Lightwave Technology. 2019. Vol. 37, no. 1. P. 188-195.
8. Zhang L., Kschischang F. R. Low-complexity soft-decision concatenated ldgm-staircase fec for high-bit-rate _fiber-optic communication // Journal of Lightwave Technology. 2017. Vol. 35, no. 9. P. 3991-3999.
9. Barakatain M., Kschischang F. R. Low-complexity concatenated ldpc-staircase codes // Journal of Lightwave Technology. 2018. Vol. 36, no. 6. P. 2443-2449.
10. Киряев Ю.С. Коррекция ошибок недвоичными staircase-кодами // Современные проблемы информатизации в анализе и синтезе технологических и программно-телекоммуникационных систем: материалы 27-ой открытой международной науч. конф. Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House, 2022. С. 219-125.
11. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. М.: Мир, 1986. С. 576.
12. Hu G., Sha J., Wang Z. Beyond 100Gbps encoder design for staircase codes // IEEE Workshop on Signal Processing Systemsю SiPS: Design and Implementation, 2016. P. 154-157.
13. Fougstedt C., Larsson-Edefors P. Energy-efficient high-throughput staircase decoders // Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC). 2018. P. 1-3.
14. Рацеев С.М., Череватенко О.И. Об алгоритмах декодирования обобщенных кодов Рид-Соломона // Вестник Самарского университета. Естественная серия. 2020. Т. 26, № 3. С. 17–29. <http://doi.org/10.18287/2541-7525-2020-26-3-17-29>.

15. Wu Yingquan. New Scalable Decoder Architectures for Reed-Solomon Codes // IEEE Transactions on communications. 2015. No. 8. P.2741-2761.
16. Локтионов Е.И., Егоров С.И. Декодер кода Рида-Соломона для сети Ethernet по стандарту IEEE802.3-2018 // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обраб. изображ. и символьной информ.: материалы 17-ой международной науч.-техн. конф. Курск: Юго-Западный гос. ун-т, 2023. С.149-151.
17. Типикин А.П., Петров В.В., Бабанин А.Г. Коррекция ошибок в оптических накопителях информации. Киев: Наукова думка, 1990. 169 с.
18. Егоров С.И., Кривонос А.В., Титов В.С. Декодирование произведений кодов Рида-Соломона в каналах с группированием ошибок // Телекоммуникации. 2018. № 11. С.15-22.
19. Egorov S., Markarian G. Error Correction Beyond the Conventional Error Bound for Reed-Solomon Codes // Journal of Electrical Engineering. 2003. No. 11-12. P. 305-310.
20. Егоров С.И. Алгоритм декодирования кодов Рида-Соломона, исправляющий вплоть до $n-k$ ошибок в кодовом слове // Труды РНТОРЭС им. А.С.Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение. Вып. XI-1. М., 2009. С. 27-30.
21. Графов О.Б., Егоров С.И., Титов В.С. Мягкое декодирование кодов Рида Соломона // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. №2, ч.1. С.17 – 23.

References

1. Egorov S.I. Error correction for information channel of computer external devices. Kursk, 2008. 252 p. (In Russ.).
2. Egorov S.I., Krivonos A.V., Titov V.S. Error correction algorithms for optical discs DVD. In: *Novye informatsionnye tekhnologii i sistemy: sb. nauch. st. XI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = New information technologies and systems: Proceedings of the XI International science conference*. Penza: Izd-vo PGU; 2014, pp. 128-133. (In Russ.).
3. Egorov S. I., Krivonos A. V. Error Correction Device for Optical Memory of Mass Application. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2017; 21 (6): 22-31 (In Russ.).
4. Egorov S.I., Egorova M.S. Application of Picket Codes in Channels for Transmission and Reproduction of Information. *Telekommunikatsii = Telecommunications*. 2023; (4):9-15. (In Russ.)
5. Smith B.P., Farhood A., Hunt A., Kschischang F.R., Lodge J. Staircase Codes: FEC for 100 Gb/s OTN. *Journal of Lightwave Technology*. 2012; 30 (1): 110–117.
6. Zhang L.M., Kschischang F.R. Staircase Codes With 6% to 33% Overhead. *Journal of Lightwave Technology*. 2014; 32 (10): 1999–2002.

7. Cai Y. Y., et al. Fpga investigation on error-flare performance of a concatenated staircase and hamming fec code for 400g interdata center interconnect. *Journal of Lightwave Technology*. 2019; 37 (1): 188-195.
8. Zhang L., Kschischang F. R. Low-complexity soft-decision concatenated ldgm-staircase fec for high-bit-rate _fiber-optic communication. *Journal of Lightwave Technology*. 2017; 35 (9): 3991-3999.
9. Barakatain M., Kschischang F. R. Low-complexity concatenated ldpc-staircase codes. *Journal of Lightwave Technology*. 2018; 36 (6): 2443-2449.
10. Kiryaev Y.S. Error correction by nonbinary staircase-codes. In: *Sovremennye problemy informatizatsii v analize i sinteze tekhnologicheskikh i programmno-telekommunikatsionnykh sistem: Materialy 27 otkrytaya mezhdunarodnaya nauch. konf = Modern problems of informatization in the analysis and synthesis of technological and software-telecommunication systems: Proceedings of the 27 open international science conference*. Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House; 2022. P. 219-125. (In Russ.)
11. Blahut R. Theory and practice of error control codes. Moscow: Mir; 1986. 576 p. (In Russ.)
12. Hu G., Sha J., Wang Z. Beyond 100Gbps encoder design for staircase codes. IEEE Workshop on Signal Processing Systems. SiPS: Design and Implementation; 2016. P. 154-157.
13. Fougstedt C., Larsson-Edefors P. Energy-efficient high-throughput staircase decoders. Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), 2018. P. 1-3.
14. Ratseev S.M., Cherevatenko O.I. On decoding algorithms for generalized Reed-Solomon codes with errors and erasures. *Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaia seriia = Vestnik of Samara University. Natural Science Series*. 2020; 26 (3): 17–29. <http://doi.org/10.18287/2541-7525-2020-26-3-17-29>. (In Russ.).
15. Wu Yingquan. New Scalable Decoder Architectures for Reed-Solomon Codes. *IEEE Transactions on Communications*. 2015; (8): 2741-2761.
16. Loktionov E.I., Egorov S.I. Reed-Solomon decoder for Ethernet of standard IEEE802.3-2018. In: *Optiko-elektronnye pribory i ustroistva v siste-makh raspoznavaniya obrazov, obrab. izobrazh. i simvol'noi inform.: Materialy 17-aya mezhdunarodnaya nauch.-tekhn konf. = Optical-electronic instruments and devices in systems for pattern recognition, image and symbolic information processing: Proceedings of the 17 international science conference*. Kursk: Southwest State University; 2023. P.149-151. (In Russ.).
17. Tipikin A.P., Petrov V.V., Babanin A.G. Error correction for optical storage. Kiev: Naukova dumka; 1990. 169 p. (In Russ.).
18. Egorov S.I., Krivonos A.V., Titov V.S. Reed-Solomon Product Code Decoding for the Burst Error Channel. *Telekommunikatsii = Telecommunications*, 2018; (11):15-22. (In Russ.).

19. Egorov S., Markarian G. Error Correction Beyond the Conventional Error Bound for Reed-Solomon Codes. *Journal of Electrical Engineering*. 2003; (11-12):305-310.

20. Egorov S.I. Reed-Solomon decoding algorithm correcting up to $n-k$ errors into codeword. In: *Trudy RNTORES im. A.S.Popova. Seriya: Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye. Is. XI-1 = Proceedings of the RNTORES named after. A.S.Popova. Series: Digital system processing and application. Is. XI-1*. Moscow, 2009. P. 27-30. (In Russ.).

21. Grafov O.B., Egorov S.I., Titov V.S. Soft decoding of Reed-Solomon codes. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2012; (2-1): 17 – 23. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Егоров Сергей Иванович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sie58@mail.ru

Sergey I. Egorov, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Computer Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sie58@mail.ru

Киряев Юрий Сергеевич, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kiryaev.yury@yandex.ru

Yuriy S. Kiryaev, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: yury@yandex.ru

Локтионов Евгений Игоревич, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zh.loktionov@yandex.ru

Evgeniy I. Loktionov, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zh.loktionov@yandex.ru

Титов Виталий Семенович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tas_06@mail.ru

Vitaliy S. Titov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Computer Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: tas_06@mail.ru

УДК 004.93

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-148-165>

Интеллектуализация процесса детектирования форм геометрических объектов

Н.А. Милостная¹ ✉

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: nat_mil@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка программного кода на языке программирования C#, реализующего алгоритм распознавания формы геометрических объектов на входном изображении при обеспечении надежности этого вычислительного процесса.

Методы. Алгоритм распознавания геометрических форм объектов основан на сочетании традиционных методов обработки изображений и интеллектуальных правил, определяющих вид геометрической формы объекта в зависимости от характеристик контуров, таких как моменты, количество их сторон и т.д. Для реализации данного метода в статье предлагается последовательность математических операций, включающая следующие этапы. Во-первых, метод включает операции размытие, преобразование исходного изображения в градации серого и инвертирование. На втором этапе осуществляется детектирование контуров и определение их характеристик, таких как моменты, периметр и др. На финальном этапе в зависимости от числа сторон, входящих в структуру контура, на основе интеллектуальных правил осуществляется сопоставление каждого найденного контура определенной геометрической фигуры.

Результаты. Разработаны алгоритм и инструкции создания программного кода для программной реализации процесса распознавания геометрической формы объектов. Определено, что предложенный алгоритм имеет высокую надежность, составляющую порядка 97%.

Заключение. Традиционные методы обработки изображений, такие как размытие и преобразование в градации серого, могут успешно сочетаться с методами выделения контуров и определения их геометрических характеристик. Подобная синергия методов обработки изображений позволяет создать алгоритм распознавания геометрических форм. Важно учитывать, что надежность и эффективность подобного алгоритма зависит от настройки пороговых значений, используемых в функциях обработки изображений, и дальнейшее исследование их характеристик может привести к улучшению результатов рассмотренного в статье алгоритма.

Ключевые слова: распознавание; выделение контуров; обработка изображения; OpenCV; EMGU.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Работа выполнена в рамках гранта РНФ №24-21-00055 – «Разработка интеллектуальной высокопроизводительной нейро-нечеткой системы технического зрения».

Для цитирования: Милостная Н.А. Интеллектуализация процесса детектирования форм геометрических объектов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №2. С. 148-165. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-148-165>.

Поступила в редакцию 29.03.2024

Подписана в печать 06.05.2024

Опубликована 25.06.2024

Intellectualization of the process of detecting shapes of geometric objects

Natalia A. Milostnaya ¹ ✉

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: nat_mil@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Development of program code in the C# programming language that implements an algorithm for recognizing the shape of geometric objects in the input image while ensuring the reliability of this computational process is the main goal of the article.

Methods. The algorithm for recognizing the geometric shapes of objects is based on a combination of traditional image processing methods and intelligent rules that determine the type of geometric shape of an object depending on the characteristics of the contours, such as moments, the number of their sides, etc. To implement this method, the following sequence of mathematical operations which includes the following stages is proposed in the article. Firstly, this method includes the following operations: blur, convert the original image to grayscale, and invert. Detection of contours and determination of their characteristics, such as moments, perimeter, etc., is carried out at the second stage of the method. And at the final stage, the comparison of each found contour of a certain geometric figure is carried out depending on the number of sides included in the structure of the contour.

Results. An algorithm and instructions for creating program code have been developed for the software implementation of the process of recognizing the geometric shape of objects. It was determined that the proposed algorithm has a high reliability approximately equal 97%.

Conclusion. Traditional image processing methods such as blurring and grayscale conversion can be successfully combined with methods for identifying contours and determining their geometric characteristics. This synergy of image processing methods makes it possible to create an algorithm for recognizing geometric shapes. It is important to consider that the reliability and efficiency of such an algorithm depends on the settings of the threshold values used in the image processing functions and further study of their characteristics can lead to improved results of the algorithm presented in the article.

Keywords: recognition; contour extraction; image processing; OpenCV; EMGU.

Conflict of interest. The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding. The work was carried out within the framework of the RNF grant No. 24-21-00055 – "Development of an intelligent high-performance neuro-fuzzy vision system".

For citation: Milostnaya N. A. Intellectualization of the process of detecting shapes of geometric objects. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(2): 148-165 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-148-165>.

Received 29.03.2024

Accepted 06.05.2024

Published 25.06.2024

Введение

Распознавание форм геометрических объектов является одной из фундаментальных задач в области компьютерного зрения и обработки изображений. Процесс детектирования форм геометрических объектов, как правило, заключается в определении максимальных перепадов значений интенсивности на искомом изображении. Найденные перепады интенсивности определяют признаки контуров искомых форм геометрических объектов.

В рамках теории распознавания образов выделяются несколько методов для решения подобных задач, к которым относятся:

1. Методы на основе выделения признаков контуров. Эти методы анализируют геометрические характеристики распознаваемых объектов, например, количество контуров, их площадь и/или периметр, другие параметры и реализуются на основе различных дескрипторов, таких как Фурье [1] и другие. Например, в статье [2] авторы использовали алгоритм группировки геометрических объектов при автоматическом раскрое листового материала с использованием локальных геометрических характеристик формы исследуемых деталей.

2. Методы на основе анализа геометрических преобразований топологии анализа данных. Эти методы исследуют зависимости, связанные с поворотом, масштабированием исходного изобра-

жения по отношению к эталонному изображению, объемом, цветом и другими характеристиками геометрических объектов. В качестве примеров подобных фильтров используются следующие технологии: Гамильтонова механика точечных ориентиров изображения, комплекс Вьеториса – Рипса или с помощью исследования расстояния Васерштейна [3, 4].

3. Методы на основе моделей выделения контуров геометрических объектов. Одной из основных моделей данной группы является оператор Хафа, использующийся для нахождения различных форм объектов (круг, ромб, линия и др.) [5]. Другая группа методов этой группы включает операторы нахождения и поиска границ изображения, например, с помощью оператора Собеля [6, 7], детектора Кэнни [8-10].

4. Методы на основе машинного обучения. Эти методы используют обученные модели для классификации геометрических форм объектов, учитывая свойства пикселей и текстурные характеристики изображения. К данным моделям относятся методы, основанные на сверточных нейронных сетях [11, 12], алгоритме случайного леса¹ и методе опорных векторов [13, 14].

¹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019612230 Российская Федерация. Классификатор рукописных цифр на основе алгоритма случайного леса: № 2018661129; заявл. 12.10.2018; опублик. 13.02.2019 / А. В. Хинензон.

Методы на основе анализа нечетких признаков изображения. Основными операциями, реализуемыми в рамках этих моделей, является бинаризация изображения с дальнейшим выделением геометрических признаков исследуемых объектов на основе нечетко-логических операций [15-20].

Материалы и методы

Рассмотрим процесс детектировать геометрические фигуры на изображении с помощью библиотеки Emgu.CV, которая является кросс-платформенной оберткой для библиотеки обработки изображений OpenCV (Open Source Computer Vision Library), предназначенной для языков программирования .NET. Она позволяет вызывать функции OpenCV из .NET-совместимых языков, таких как C#, VB.NET и C++.

Алгоритм детектирования геометрических фигур включает следующие этапы.

1. Загрузка изображения.

Для реализации этого этапа необходимо воспользоваться методов openFileDialog (см. Листинг 1)

```
DialogResult res = openFileDialog.ShowDialog();
if(res == DialogResult.OK)
{
    input_image = new Image<Bgr, byte>(openFileDialog.FileName);
    pictureBox1.Image = input_image.Bitmap;
}
else
```

```
{
    MessageBox.Show("Изображение не выбрано!",
        "Ошибка", MessageBoxButtons.OK,
        MessageBoxIcon.Error );
}
```

Листинг 1. Загрузка изображения

Listing 1. Uploading an image

2. Размытие, преобразование в градации серого и инвертирование изображения.

Для реализации этой процедуры используем доступные функции библиотеки emgu.CV, такие как SmoothGaussian(), Convert<Gray, byte>() и ThresholdBinaryInv(new Gray(230), new Gray(255)). Вначале процедура SmoothGaussian() размывает входное изображение, затем функция Convert<Gray, byte>() преобразует полученное изображение в градации серого, и на последнем шаге процедура ThresholdBinaryInv(new Gray(230), new Gray(255)) инвертирует полученное изображение с учетом пороговых уровней, заданных в ней (см. Листинг 2).

```
Image<Gray, byte> grayImage = input_image.SmoothGaussian(5).Convert<Gray, byte>().ThresholdBinaryInv(new Gray(230), new Gray(255));
pictureBox2.Image = grayImage.Bitmap;
```

Листинг 2. Размытие, преобразование в оттенки серого и инвертирование

Listing 2. Blur, grayscale, and invert

Визуальное представление этих операций изображено на рис. 1.

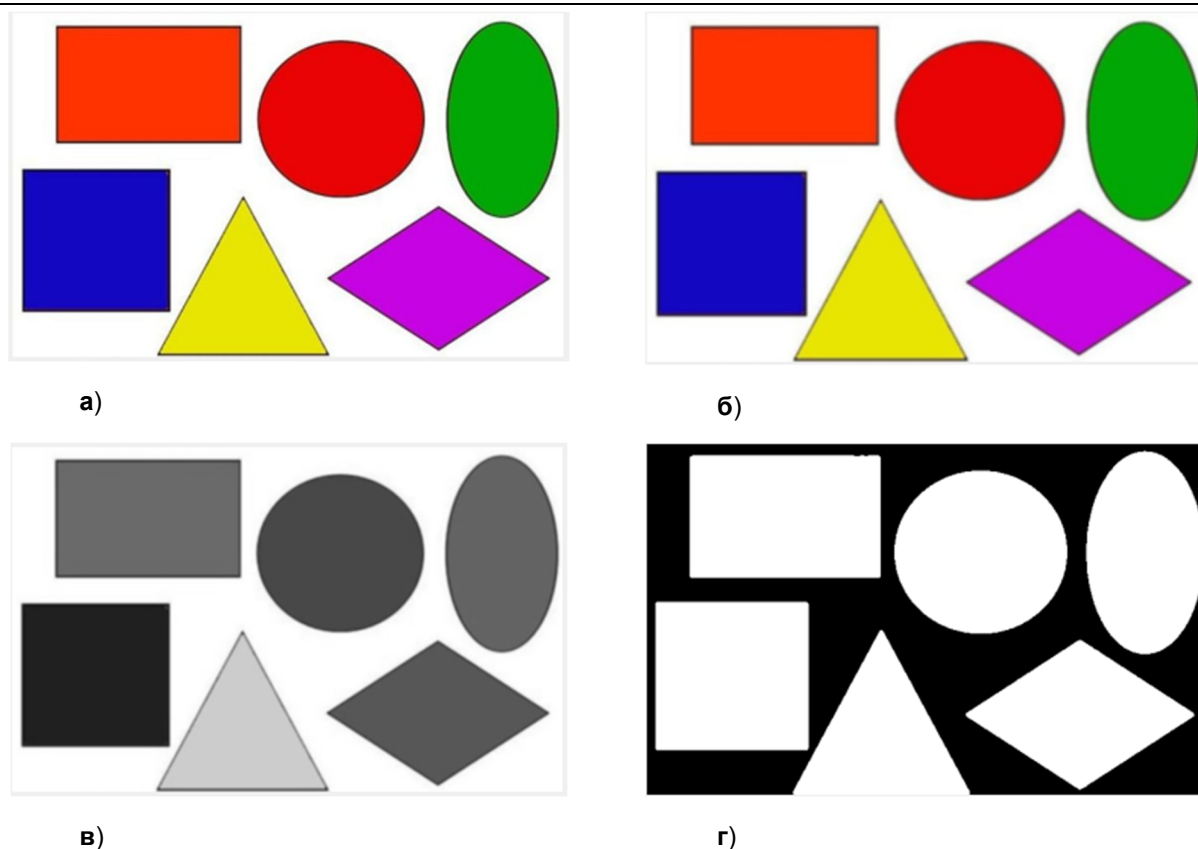


Рис. 1. Пошаговое выполнение операций: **а** – исходное изображение; **б** – размытие с помощью фильтра Гаусса; **в** – преобразование в градации серого; **г** – инверсия изображения

Fig. 1. Step-by-step execution of operations: **a** – original image; **б** – blur using a Gaussian filter; **в** – conversion to grayscale; **г** – image inversion

3. Создание переменной для хранения контуров.

Данная процедура в библиотеке EmguCV создается с помощью класса VectorOfVectorOfPoint [21]. Объявление переменной в C# для создания вектора контуров осуществляется с помощью команды:

```
VectorOfVectorOfPoint contours =
new VectorOfVectorOfPoint();
// contours – это переменная, ко-
торая хранить Вектор контуров
// Добавление контуров в Вектор
contours.Push(new VectorOfPoint(new
```

```
Point[] { new Point(10, 20),
          new Point(30, 40) }));
contours.Push(new VectorOfPoint(new
Point[] { new Point(50, 60),
          new Point(70, 80) }));
// Получение контуров из Вектора
VectorOfPoint contour1 = contours[0];
VectorOfPoint contour2 = contours[1];
```

Листинг 3. Построение контуров объекта

Listing 3. Building object contours

4. Создание многомерной матрицы для хранения массива контурных векторов.

Создание многомерной матрицы для хранения массива полученных векторов на предыдущем шаге использует

класс `Mat()`. В данном случае он представляет собой базовый контейнер для хранения изображений и матриц. Создание подобной матрицы осуществляется с помощью команды:

```
Mat matrix = new Mat();
```

где `matrix` – это переменная, которая хранит объект класса `Mat()`.

5. Создание процедуры поиска контуров объектов.

Процедура поиска контуров объектов осуществляется с помощью класса `CvInvoke.FindContours` [22]. Данный метод позволяет извлечь контура из бинарного изображения полученного на втором шаге алгоритма. Процедура извлечения контуров записывается:

```
CvInvoke.FindContours(invert_grayImage,  
contours, matrix_contours,  
Emgu.CV.CvEnum.RetType.External,  
Emgu.CV.CvEnum.ChainApproxMethod.  
ChainApproxSimple);
```

где `invert_grayImage` – изображение, из которого извлекаются контура (изображение, хранимое в переменной `invert_grayImage` должно быть в оттенках серого и бинарным);

`contours` – выходной параметр, в котором будут храниться обнаруженные контуры, представляющие собой вектор точек (координат пикселей на изображении);

`matrix_contours` – многомерная матрица, в которой будут храниться извлеченные контура с помощью метода `CvInvoke.FindContours`;

`Emgu.CV.CvEnum.RetType.External` – указание режима извлечения контуров,

в данном случае метод `External` означает, что извлекаться будут только внешние контуры, то есть те контуры, которые не содержатся внутри других контуров).

`Emgu.CV.CvEnum.ChainApproxMethod.ChainApproxSimple` – указание метода аппроксимации контуров, в данном случае используется простая аппроксимация `ChainApproxSimple`, которая используется для сокращения точек, описывающих извлеченный контур из бинарного изображения.

Отметим, что контурная аппроксимация – это процесс редукции количества точек в извлеченном контуре из бинарного изображения, при сохранении общей формы полученного контура. Например, для хранения прямоугольника достаточно хранить координаты (x, y) верхней крайней левой его точки и нижней правой точки. Данный метод аппроксимации основан на алгоритме Рамера-Дугласа-Пекера [23]. Он аппроксимирует контур, заменяя длинные последовательности близких точек одной прямой линией между начальной и конечной точками. Например, для описания прямой линии, состоящей из 100 точек, достаточно хранить только 2 точки – начальную и конечную.

6. Распознанных фигур по найденным контурам.

Данный этап включается несколько операций. Причем данная процедура выполняется в цикле и для всех найденных контуров на предыдущем этапе.

6.1. Нахождение периметра известного контура.

Данная процедура осуществляется с помощью метода `CvInvoke.ArcLength`, при этом в вещественную переменную `perimeter` записывается найденное значение периметра контура или его длина:

```
double perimeter =
```

```
CvInvoke.ArcLength(contours[i], true);
```

где `CvInvoke.ArcLength` – метод для нахождения периметра контура; `contours[i]` – переменная, которая указывает контур, хранящийся в массиве `matrix_contours`, для которого осуществляется расчет периметра; i – номер итерации или номер контура, для которого осуществляется расчет периметра; `true` – логическая переменная, если установлена в значение Истина, то метод рассматривает кривую как замкнутую, в противном случае, кривая рассматривается как незамкнутая.

6.2. Создание массива вектора точек.

Данная процедура осуществляется с помощью класса `VectorOfPoint`, который в C# библиотеке `EmguCV` используется для хранения и обработки наборов точек. Создание нового экземпляра класса `VectorOfPoint` осуществляется с помощью следующего конструктора:

```
VectorOfPoint approx =
```

```
new VectorOfPoint();
```

где `approx` – переменная, в которую записывается вектор аппроксимированных точек контура.

6.3. Аппроксимация найденного контура.

Данная процедура осуществляется с помощью метода `CvInvoke.ApproxPolyDP`, который используется для создания нового контура найденной геометрической фигуры с меньшим числом вершин на основе заданной точности редукции числа точек:

```
CvInvoke.ApproxPolyDP(contours[i],  
approx, 0.04*perimetr, true);
```

где `approx` – переменная, в которой хранится результат аппроксимации или редукции числа точек; `0.04*perimetr` – переменная, определяющая точность аппроксимации, то есть максимальное расстояние между исходной кривой и ее аппроксимацией; `true` – логическая переменная, указывающая, в случае Истина, что аппроксимированная кривая замкнута, то есть её первая и последняя вершины соединены, в противном случае она не замкнута.

6.4. Обрисовка контуров, найденных геометрических фигур.

Данная процедура осуществляется с помощью метода `CvInvoke.DrawContours`, который в библиотеке `EmguCV` используется для обрисовки контуров расположенных геометрических фигур на указанном изображении:

```
CvInvoke.DrawContours(input_image,  
contours, i,
```

```
new MCvScalar(0, 33, 255), 3)
```

где `input_image` – это входное изображение, на котором обрисовываются контуры; `contours` – массив контуров, который представлен в виде вектора то-

чек; i – индекс контура, который необходимо нарисовать, в случае указания отрицательного значения будут обрисованы все контуры; `new MCvScalar(0, 33, 255)` – цвет обрисовки контуров (оранжевый); 3 – толщина линий обрисовки контуров.

Программный код для реализации данной процедуры представлен в Листинге 4.

```
for (int i = 0; i < contours.Size; i++)
{
    double perimetr =
    CvInvoke.ArcLength(contours[i], true);
    VectorOfPoint approx =
```

```
new VectorOfPoint();
    CvInvoke.ApproxPolyDP(contours[i],
    approx, 0.04*perimetr, true);
    CvInvoke.DrawContours(input_image,
    contours, i, new MCvScalar(0, 33, 255), 3);
    pictureBox2.Image =
    input_image.Bitmap;
}
```

Листинг 4. Процедура для детектирования контуров всех найденных геометрических объектов.

Listing 4. Procedure for detecting the contours of all found geometric objects

Результат работы программного кода, указанного в Листинге 3, приведен на рис. 2.

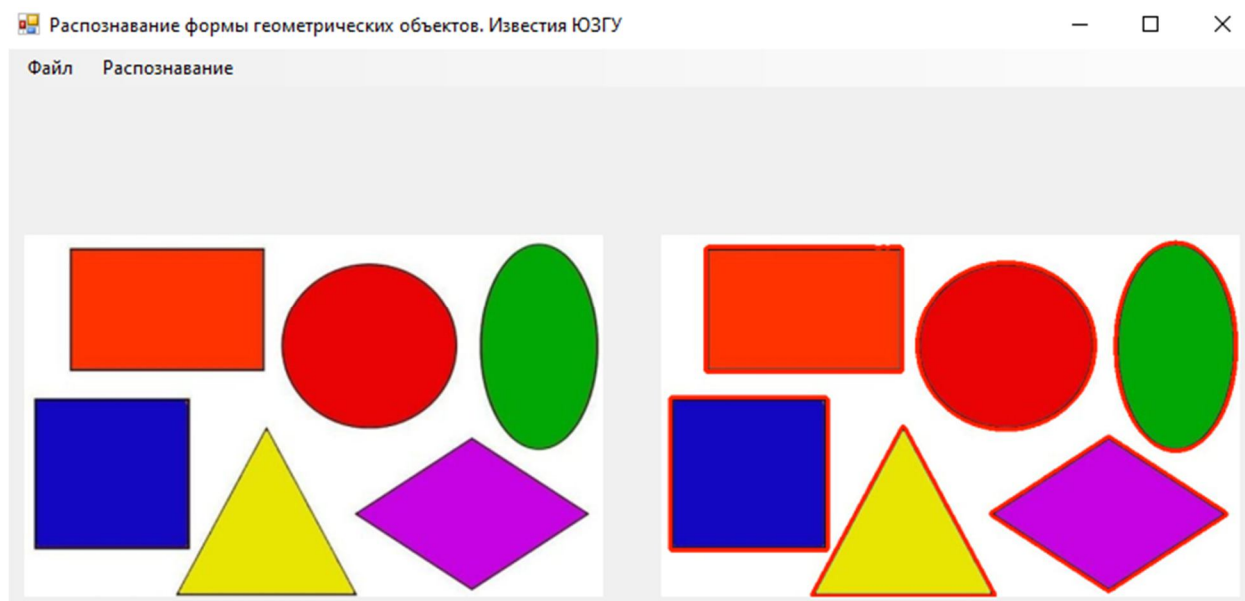


Рис. 2. Обрисовка распознанных контуров геометрических фигур

Fig. 2. Drawing recognized contours of geometric shapes

7. Распознавание формы найденных геометрических фигур.

Данный этап также состоит из нескольких вычислительных процедур, реализованных в одном цикле.

7.1. Нахождение центра масс распознанного контура.

С помощью этой процедуры в центре распознанного объекта будет размещаться надпись, соответствующая

форме найденной геометрической фигуры. Осуществляется с помощью созданного нового класса Moments, который используется для вычисления моментов (пространственных или центральных) до третьего порядка. С помощью моментов первого порядка вычисляются координаты центра тяжести (центра масс) распознанных геометрических фигур или их площадь. Для реализации этих вычислений рекомендуется пользоваться функциями: moments.M10 и moments.M01 – это моменты первого порядка по осям X и Y соответственно. Например, moments.M10 вычисляется как отношение суммы координат точек пикселя по оси абсцисс на их количество. Нулевой момент moments.M00 определяет площадь найденного контура геометрической фигуры. В нашем методе используем моменты только первого порядка:

```
Moments moments = CvInvoke.Moments(contours[i]);
int x = (int)(moments.M10
/ moments.M00);
int y = (int)(moments.M01
/ moments.M00);
```

Следует отметить, что моменты второго порядка: moments.M20, moments.M11 и moments.M02 используются для определения ориентации геометрического объекта. В то время как моменты третьего порядка moments.M30, moments.M21, moments.M12 и moments.M03 применяются для анализа формы объекта.

7.2. Анализ формы детектируемого объекта.

В данной процедуре анализируется количество контуров в распознанном объекте. Данная величина хранится в переменной, созданной на 6.2 этапе рассматриваемого алгоритма. В зависимости от значения этой переменной определяется форма геометрической фигуры.

В случае, если переменная approx=3 равняется трем, это означает, что распознанная фигура имеет форму треугольника. Тогда для добавления текста в точку центра распознанного треугольника используется метод CvInvoke.PutText библиотеки EmguCV. Он позволяет отображать на экране монитора текст с заданными параметрами шрифта и цвета:

```
CvInvoke.PutText(input_image,
"Triangle", new Point(x - 55, y),
Emgu.CV.CvEnum.FontFace.HersheySimplex, 1,
new MCvScalar(0, 0, 0), 2);
```

где input_image – указывается изображение и будет отображаться текст; "Triangle" – текст, который будет напечатан и обозначает форму распознанной фигуры (в данном случае треугольник); new Point(x - 55, y) – в эту переменную указываются координаты левого нижнего угла первой буквы текста смещенной на 55 пикселей по оси абсцисс; Emgu.CV.CvEnum.FontFace.HersheySimplex – указывается тип шрифта, в данном случае Hershey Simplex; 1 – в данной переменной указан масштаб шрифта;

`new MCvScalar(0, 0, 0)` – переменная в которой указан цвет шрифта, в данном случае черный; 2 – указывается толщина шрифта.

В случае, если переменная `approx=4` равняется четырем, это означает, что распознанная фигура имеет прямоугольную форму. Данную форму могут иметь несколько типов фигур, например, квадрат, ромб и непосредственно прямоугольник.

Для распознавания квадрата необходимо вычислить соотношение сторон (ширины и высоты) распознанной геометрической фигуры `rectRatio` и проверить насколько близко это отношение к единице.

```
double rectRatio = CvInvoke.ContourArea(contours[i]) /  
(contours[i].Size * contours[i].Size);  
if (rectRatio >= 0.8 && rectRatio <= 1.2)  
    CvInvoke.PutText(input_image,  
        "Square", new Point(x - 55, y),  
        Emgu.CV.CvEnum.FontFace.HersheySimplex, 1,  
        new MCvScalar(0, 0, 0), 2);
```

В противном случае форма распознанной фигуры будет прямоугольником.

Для проверки распознавания ромба необходимо вычислить показатель `rhRatio`, который определяет соотношение площади геометрической фигуры к квадрату его периметра. В случае, если разница модуля этой величины и единицы меньше порогового значения (по умолчанию 1.2), то это означает, что распознанная геометрическая фигура является ромбом.

```
double rhRatio = CvInvoke.ContourArea(contours[i]) /  
(contours[i].Size * contours[i].Size);  
if (Math.Abs(rhRatio - 1.0) < 1.2)  
    CvInvoke.PutText(input_image,  
        "Rhombus", new Point(x - 55, y),  
        Emgu.CV.CvEnum.FontFace.HersheySimplex, 1,  
        new MCvScalar(0, 0, 0), 2);
```

В случае, если переменная `approx=5` равняется пяти, это означает, что распознанная фигура имеет форму пентагона.

В случае, если переменная `approx>5` равняется пяти, это означает, что распознанная фигура имеет закругленную форму. В этом случае необходимо распознать, является ли геометрическая фигура кругом или овалом. Для решения этой задачи необходимо ввести показатель `crRatio`, который также показывает отношение площади распознанной геометрической фигуры к его периметру в квадрате. В случае, если абсолютная разность этого параметра с единицей не превышает заданное пороговое значение (по умолчанию 0.15), то это означает, что найденная геометрическая фигура является кругом, в противном случае – это овал.

```
double crRatio = 4 * Math.PI *  
moments.M00 /  
(CvInvoke.ArcLength(contours[i], true) *  
CvInvoke.ArcLength(contours[i], true));  
if (Math.Abs(crRatio - 1.0) < 0.15)  
    CvInvoke.PutText(input_image,  
        "Circle", new Point(x - 55, y),  
        Emgu.CV.CvEnum.FontFace.HersheySimplex, 1,  
        new MCvScalar(0, 0, 0), 2);
```

Представленные в этом разделе семь этапов позволяют реализовать программный код для детектирования формы геометрических фигур.

Результаты и их обсуждение

Алгоритм распознавание формы геометрических объектов был реализован в виде специализированного программного обеспечения, разработанного на языке C# в среде Microsoft Visual

Studio 2022. При этом использовался ПК IntelCore i5-8600K (3,60 ГГц), ОЗУ 16 Гб, Win10. Эксперименты повторялись 100 раз для каждого исходного изображения, по которому необходимо было распознать геометрическую форму объекта.

Визуализация процесса детектирования формы геометрических объектов представлена на рис. 3.

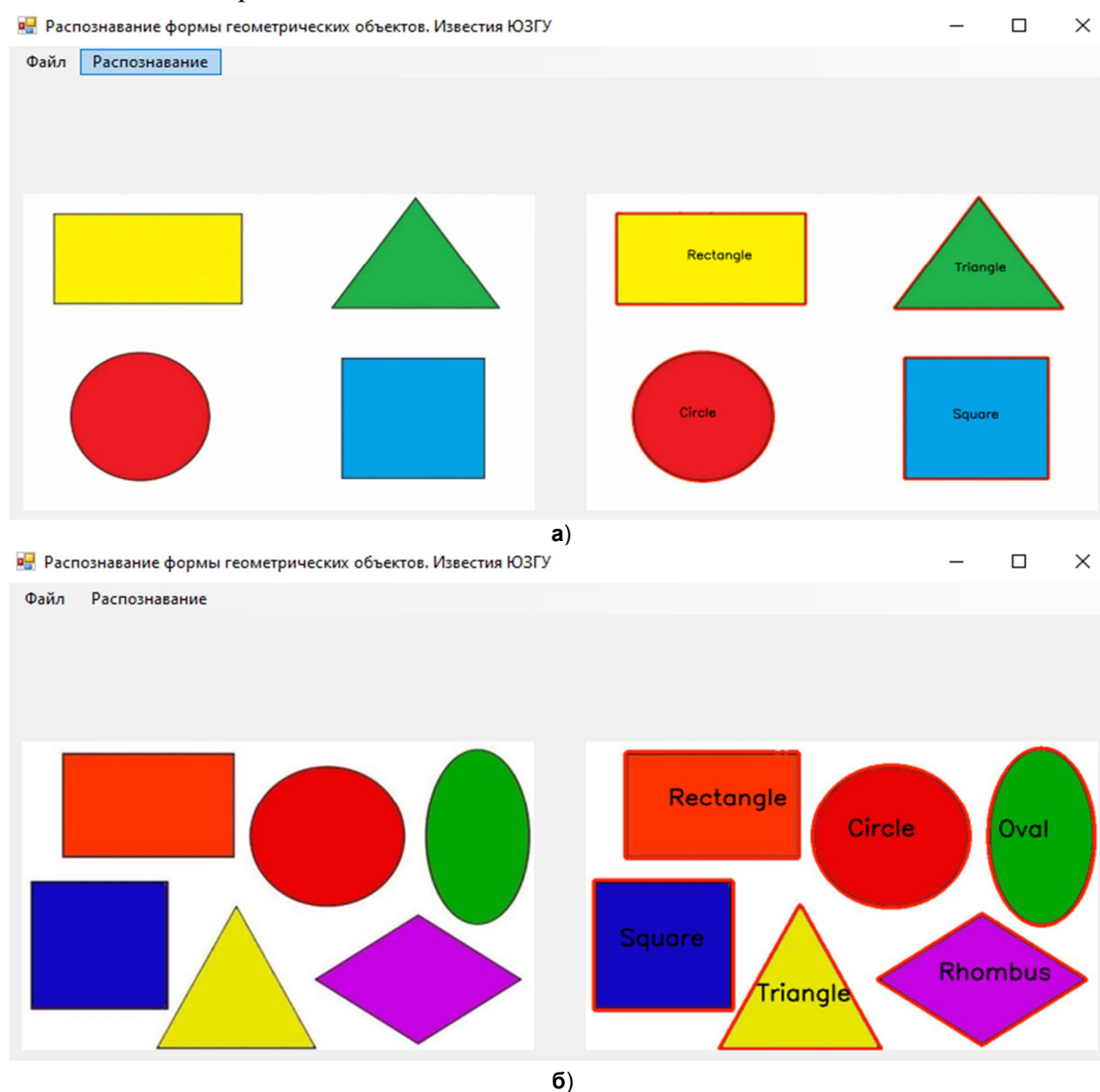


Рис. 3. Распознавание формы геометрических объектов: **а** – Эксперимент 1; **б** – Эксперимент 2

Fig. 3. Recognition of the shape of geometric objects: **a** – Experiment 1; **b** – Experiment 2

Для обеспечения надежности работоспособности разработанной программы распознавания геометрических фигур был выполнен тест для распознавания форм фигур, используя тестовый набор фигур, расположенных на ресурсе

се EMGU.COM¹ [25]. Результаты теста приведены на рис. 4.

Результаты вычислительного эксперимента распознавания формы геометрических фигур с использованием библиотеки Emgu CV сведены в табл. 1.

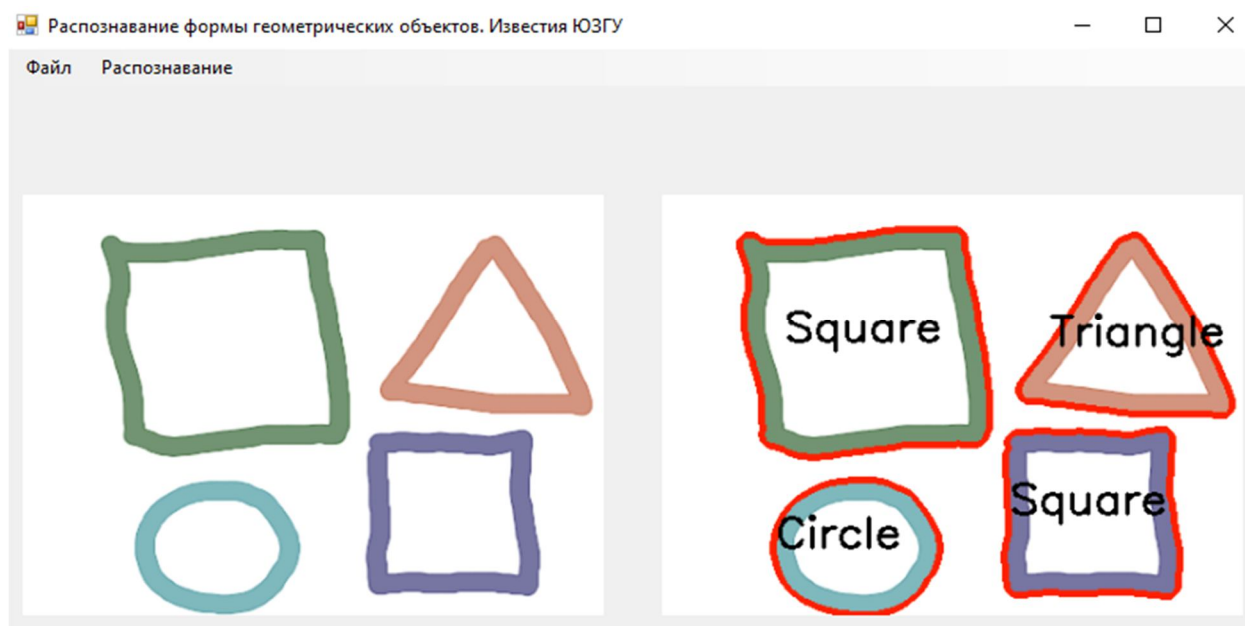


Рис. 4. Распознавание формы геометрических объектов для тестовой выборки ресурса emgu.com

Fig. 4. Shape recognition of geometric objects for a test sample of the emgu.com resource

Таблица 1. Вычислительный эксперимент распознавания геометрических фигур

Table 1. Computational experiment of recognition of geometric shapes

Фигура / Figure	Количество обнаруженных объектов / Number of detected objects		
	Эксперимент 1 / Experiment 1	Эксперимент 2 / Experiment 2	Эксперимент 3 / Experiment 3
Треугольник	1	1	1
Квадрат	1	1	2
Ромб		1	
Прямоугольник	1	1	
Круг	1	1	1
Овал		1	

¹ Адрес тестового ресурса emgu.com https://www.emgu.com/wiki/index.php/Shape_%28Triangle,_Rectangle,_Circle,_Line%29_Detection_in_CSharp (Доступ свободный).

Как видно из табл. 1, все фигуры для всех изображений были распознаны правильно.

Для оценки надежности алгоритма распознавания форм геометрических объектов использовалась следующая методика.

1. В процессе исследования использовались 100 различных изображений с разными геометрическими фигурами, и для каждого из них применялся предложенный во втором разделе статьи алгоритм.

2. Для каждой из фигур, сведенных в табл. 1, сравнивались результаты распознавания геометрических фигур при

работе алгоритма с реальными объектами на изображениях.

3. Данные сводились в сводную таблицу, аналогичную табл. 1.

4. Затем анализировались результаты эксперимента.

4.1. Если алгоритм правильно обнаруживал объект, то считалось как True Positive (TP).

4.2. Если алгоритм ошибочно обнаруживал объект, то считалось как False Positive (FP).

4.3. Если алгоритм не обнаруживал объект, то считалось как False Negative (FN).

Данные анализа работы алгоритма сведены в табл. 2.

Таблица 2. Анализ тестирования 100 изображений

Table 2. Analysis of testing 100 images

Фигура / Figure	Количество обнаруженных объектов / Number of detected objects		
	Правильно обнаруженные объекты / Correctly detected objects	Ложно обнаруженные объекты / Falsely detected objects	Пропущенные объекты / Missed objects
Треугольник	95		
Квадрат	102	1	1
Ромб	43	2	2
Прямоугольник	73		
Круг	54	2	
Овал	32	3	1
	TP	FP	FN
Сумма	399	8	4

5. Надежность эксперимента вычислялась с помощью следующей формулы:

$$N = \frac{TP}{TP + FP + FN},$$

где TP – количество верно обнаруженных объектов; FP – количество ложно обнаруженных объектов; FN – количество пропущенных объектов.

Учитывая данные табл. 2, надежность определилась как

$$N = \frac{399}{399 + 8 + 4} = 0,97$$

и составила 97%, что говорит о высокой надежности рассмотренного алгоритма.

Выводы

В статье представлен алгоритм распознавания геометрической формы объектов и его программная реализация на основе библиотеки EmguCV на языке

программирования C#. Вычислительный процесс детектирования геометрической формы объектов хорошо проиллюстрирован. Проведены экспериментальные исследования, в результате которых было установлено, что предложенная модель обладает высокой надежностью и составляет 97%. Улучшить надежность возможно за счет подбора пороговых значений при детектировании таких форм, как овал и ромб в условиях, задающих их определение.

Список литературы

1. Гнеушев А. Н., Мурынин А. Б. Адаптивный градиентный метод выделения контурных признаков объектов на изображениях реальных сцен // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2003. № 6. С. 153-160.
2. Алгоритм группировки геометрических объектов при автоматическом раскрое листового материала с использованием локальных характеристик формы / М. А. Чертов, Г. Е. Руденский, С. Г. Псахье, А. В. Скворцов // Вычислительные технологии. 2006. Т. 11, № 2. С. 93-107.
3. Чуканов С. Н. Сравнение изображений объектов методами вычислительной топологии // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18, № 5. С. 1043-1065. <https://doi.org/10.15622/sp.2019.18.5.1043-1065>.
4. Чуканов С. Н. Сравнение диффеоморфных изображений на основе формирования персистентных гомологий // Моделирование и анализ информационных систем. – 2019. Т. 26, № 3. С. 450-468. <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2019-3-450-468>.
5. Шабалин А. С., Рахматуллов И. И., Полянин Н. А. Сравнение двух методов распознавания образов геометрических фигур // Ученые записки УлГУ. Серия: Математика и информационные технологии. 2021. № 2. С. 82-89.
6. Воронова Л. В., Панишева Е. В. К вопросу выбора метода определения границ и распознавания графического объекта применительно к задаче идентификации номера автомобиля // Технологии и качество. 2022. № 2(56). С. 46-50. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2022-2-56-46-50>.
7. Бобырь М.В., Емельянов С.Г., Милостная Н.А. *Алгоритм построения 3d сцен распознанных объектов по картам глубин* // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023. Т. 27, №2. С. 90-104. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-90-104>.

8. A method for creating a depth map based on a three-level fuzzy model / M. Bobyr, A. Arkhipov, S. Emelyanov, N. Milostnaya // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2023. Vol.117, no. Part B. P. 105629. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105629>.
9. Построение карты глубины с использованием модернизированного фильтра Канни. Часть 1 / М. В. Бобырь, А. Е. Архипов, А. С. Якушев, Ц. Цао // Промышленные АСУ и контроллеры. 2021. № 4. С. 12-20. <https://doi.org/10.25791/asu.4.2021.1271>.
10. Построение карты глубины с использованием модернизированного фильтра Канни. Часть 2 / М. В. Бобырь, А. Е. Архипов, А. С. Якушев, С. Бхаттачарья // Промышленные АСУ и контроллеры. 2021. № 5. С. 3-15. <https://doi.org/10.25791/asu.5.2021.1277>.
11. Годунов А. И., Балаян С. Т., Егоров П. С. Сегментация изображений и распознавание объектов на основе технологии сверточных нейронных сетей // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3(35). С. 62-73. <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2021-3-8>.
12. Лобанов М. Г., Шоломов Д. Л. Об ускорении архитектуры сверточной нейронной сети на базе ResNet в задаче распознавания объектов дорожной сцены // Информационные технологии и вычислительные системы. 2019. № 3. С. 57-65. <https://doi.org/10.14357/20718632190305>.
13. Кадуков Е. П. Распознавание объектов контроля на радиолокационных изображениях с использованием метода опорных векторов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2022. № 9-10(171-172). С. 96-105.
14. А. Ю. Поливанов, Ю. В. Иванов Распознавание человека в системе технического зрения мобильного робота на основе метода опорных векторов // Вестник МГТУ "Станкин". 2023. № 3(66). С. 17-27.
15. Пугин Е. В., Жизняков А. Л. Алгоритмы обработки изображений для обнаружения объектов с использованием нечётких признаков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2020. № 2(38). С. 59-65.
16. Нечетко-логические методы в задаче детектирования границ объектов / М. В. Бобырь, А. Е. Архипов, С. В. Горбачев, Ц. Цао, С. Бхаттачарья // Информатика и автоматизация. 2022. Т.21, №2. С. 376-404. <https://doi.org/10.15622/ia.21.2.6>
17. Прикладные нейро-нечеткие вычислительные системы и устройства / М. В. Бобырь, С. Г. Емельянов, А. Е. Архипов, Н. А. Милостная. М.: Издательский Дом "Инфра-М", 2023. 263 с. <https://doi.org/10.12737/1900641>.
18. Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Bulatnikov V. A. The fuzzy filter based on the method of areas' ratio // Applied Soft Computing. 2022. Vol. 117. P. 108449. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108449>.

19. Бобырь М. В., Милостная Н. А. Анализ использования мягких арифметических операций в структуре нечетко-логического вывода // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 7(133). С. 7-15. <https://doi.org/10.14489/vkit.2015.07.pp.007-015>.
20. Бобырь М. В., Архипов А. Е., Якушев А. С. Распознавание оттенка цветовой метки на основе нечёткой кластеризации // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 20, № 2. С. 407-434. <https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.2.6>.
21. Emgu CV Library Documentation. VectorOfVectorOfPoint Class. URL: www.emgu.com/wiki/files/3.0.0/document/html/b29e1d11-e75c-6bbe-4b3b-7d8e6395a733.htm (Доступ свободный).
22. Emgu CV Library Documentation. CvInvoke.FindContours Method. URL: www.emgu.com/wiki/files/4.5.5/document/html/M_Emgu_CV_CvInvoke_FindContours.htm (Доступ свободный).
23. Балун В. Н., Дроздов Н. А., Дорошенко Е. В. Программная реализация алгоритма Дугласа-Пекера для уменьшения числа точек полилинии // Современные тенденции развития и перспективы внедрения инновационных технологий в машиностроении, образовании и экономике. 2019. Т. 5, № 1. С. 157-163.

References

1. Gneushev A. N., Murynin A. B. Adaptive gradient method for selecting contour features of objects in images of real scenes. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya = Izvestia of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems*. 2003; (6): 153-160. (In Russ.).
2. Chertov M. A., Rudensky G. E., Psakhye S. G., Skvortsov A.V. An algorithm for grouping geometric objects in automatic cutting of sheet material using local shape characteristics. *Vychislitel'nye tekhnologii = Computational Technologies*. 2006; 11 (2): 93-107. (In Russ.).
3. Chukanov S. N. Comparison of images of objects by methods of computational topology. *Trudy SPIIRAN = Proceedings of SPIIRAN*. 2019; 18(5): 1043-1065. (In Russ.). <https://doi.org/10.15622/sp.2019.18.5.1043-1065>.
4. Chukanov S. N. Comparison of diffeomorphic images based on the formation of persistent homologies. *Modelirovanie i analiz informatsionnykh sistem = Modeling and Analysis of Information Systems*. 2019; 26 (3): 450-468. (In Russ.). <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2019-3-450-468>.
5. Shabalin A. S., Rakhmatullov I. I., Polyanin N. A. Comparison of two methods of pattern recognition of geometric shapes. *Uchenye zapiski UIGU. Seriya: Ma-tematika i informatsionnye tekhnologii = Scientific Notes of UlsU. Series: Mathematics and Information Technology*. 2021; (2): 82-89. (In Russ.).

6. Voronova L. V., Panisheva E. V. On the issue of choosing a method for determining boundaries and recognizing a graphic object in relation to the problem of identifying a car number. *Tekhnologii i kachestvo = Technology and Quality*. 2022; (2): 46-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2022-2-56-46-50>.
7. Bobyr M. V., Emelyanov S. G., Milostnaya N. A. Algorithm for Creating 3d Scenes of Recognized Objects from Depth Maps. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(2): 90-104 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-90-104>.
8. Bobyr M., Arkhipov A., Emelyanov S., Milostnaya N. A method for creating a depth map based on a three-level fuzzy model. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023; 117 (Part B): 105629. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105629>.
9. Bobyr M. V., Arkhipov A. E., Yakushev A. S., Cao Ts. Building a depth map using an upgraded Canny filter. Pt. 1. *Promyshlennyye ASU i kontroly = Industrial automated control systems and controllers*. 2021; (4): 12-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.25791/asu.4.2021.1271>.
10. Bobyr M. V., Arkhipov A. E., Yakushev A. S., Bhattacharya S. Building a depth map using an upgraded Canny filter. Pt. 2. *Promyshlennyye ASU i kontroly = Industrial automated control systems and controllers*, 2021; (5): 3-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.25791/asu.5.2021.1277>.
11. Godunov A. I., Balanyan S. T., Egorov P. S. Image segmentation and object recognition based on convolutional neural network technology. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021; (3): 62-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2021-3-8>.
12. Lobanov M. G., Sholomov D. L. On accelerating the architecture of a convolutional neural network based on ResNet in the task of recognizing objects of the road scene. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy = Information Technologies and Computing Systems*. 2019; (3): 57-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.14357/20718632190305>.
13. Kadukov E. P. Recognition of control objects on radar images using the method of reference vectors. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu = Questions of defense technology. Series 16: Technical means of countering terrorism*. 2022; (9-10): 96-105. (In Russ.).
14. Polivanov A. Yu., Ivanov Yu. V. Human recognition in the technical vision system of a mobile robot based on the method of support vectors. *Vestnik MGTU "Stankin" = Bulletin of the Moscow State Technical University "Stankin"*. 2023; (3): 17-27. (In Russ.).
15. Pugin E. V., Zhiznyakov A. L. Image processing algorithms for detecting objects using fuzzy features. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy = Radio Engineering and Telecommunication Systems*. 2020; (2): 59-65. (In Russ.).

16. Bobyr M. V., Arkhipov A. E., Gorbachev S. V., Cao Ts., Bhattacharya S. Fuzzy logic methods in the problem of detecting object boundaries. *Informatika i avtomatizatsiya = Computer Science and Automation*. 2022; (21): 376-404. (In Russ.). <https://doi.org/10.15622/ia.21.2.6>
17. Bobyr M. V., Yemelyanov S. G., Arkhipov A. E., Milostnaya N. A. Applied neuro-fuzzy computing systems and devices. Moscow: Infra-M; 2023. 263 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/1900641>.
18. Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Bulatnikov V. A. The fuzzy filter based on the method of areas' ratio. *Applied Soft Computing*. 2022; 117: 108449. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108449>.
19. Bobyr M. V., Milostnaya N. A. Analysis of the use of soft arithmetic operations in the structure of fuzzy logical inference. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Bulletin of Computer and Information Technologies*. 2015; (7): 7-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.14489/vkit.2015.07.pp.007-015>.
20. Bobyr M. V., Arkhipov A. E., Yakushev A. S. [Recognition of the shade of a color label based on fuzzy clustering]. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation*, 2021; 20 (2): 407-434. (In Russ.). <https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.2.6>.
21. Emgu CV Library Documentation. VectorOfVectorOfPoint Class. Available at: www.emgu.com/wiki/files/3.0.0/document/html/b29e1d11-e75c-6bbe-4b3b-7d8e6395a733.htm (Доступ свободный).
22. Emgu CV Library Documentation. CvInvoke.FindContours Method. Available at: www.emgu.com/wiki/files/4.5.5/document/html/M_Emgu_CV_CvInvoke_FindContours.htm (Доступ свободный).
23. Balun V. N., Drozdov N. A., Doroshenko E. V. Software implementation of the Douglas-Pecker algorithm for reducing the number of polyline points. *Sovremennye tendentsii razvitiya i perspektivy vnedreniya innovatsionnykh tekhnologii v mashinostroenii, obrazovanii i ekonomike = Modern development trends and prospects for the introduction of innovative technologies in mechanical engineering, education and economics*. 2019; 5 (1): 157-163. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the Author

Милостная Наталья Анатольевна,
доктор технических наук, доцент,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: nat_mil@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3779-9165>

Natalya A. Milostnaya, Dr. of Sci.
(Engineering), Associate Professor, Southwest
State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: nat_mil@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3779-9165>

УДК 004.832.38

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-166-183>

Построение интеллектуальных функций принадлежности и реализация нечетко-логического вывода на их основе

М.В. Бобырь¹ ✉, Б. А. Бондаренко¹, А. Ю. Алтухов¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: maxbobyry@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Предложенный в данной работе метод нацелен на повышение быстродействия и точности вычислительного процесса обучения нечетко-логической системы. В качестве предмета исследования использовались разработанные параметризованные функции принадлежности. Показателем эффективности выступало влияние изменения меток входных функций принадлежности, созданных традиционным методом и с помощью параметризованных функций принадлежности, на выходную характеристику.

Методы. Разработан и реализован метод построения параметрических функций принадлежности и использующиеся в процессе фаззификации нечетко-логического вывода. Помимо фаззификации, в системе реализованы процесс композиции нечетких правил и дефаззификация. В процессе фаззификации использовались треугольные функции принадлежности. В качестве композиционного правила использовались 6 активированных степеней принадлежности, объединенных на основе композиционного правила Заде в 5 заключений нечетко-логического вывода. На этапе дефаззификации использовался упрощенный метод центра тяжести. Объектом исследования выступал нечетко-логический вывод, использующий традиционные и параметризованные функции принадлежности, синтезируемые на этапе фаззификации.

Результаты. Получена математическая модель нечеткого вывода с реализованными параметризованными функциями принадлежности на этапе фаззификации. На основе эксперимента сделан вывод, что предложенная модель имеет более гладкую результирующую поверхность при изменении одного параметра входной функции принадлежности. При этом обеспечивается условие разбиения единицы.

Заключение. Разработана нечетко-логическая MISO-система на основе алгоритма Мамдани, использующая параметризованные функции принадлежности на этапе фаззификации, которая реализована в среде моделирования Simulink. Построены кривые значений результатов расчета нечеткого логического вывода для трех наборов функций принадлежности входных переменных. Проведено сравнение с традиционными методами формирования. Отмечены преимущества и недостатки описанных методов.

Ключевые слова: интеллектуализация; функция принадлежности; нечеткая логика; нечетко-логический вывод, параметризация.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания (проект № 0851-2020-0032).

© Бобырь М.В., Бондаренко Б. А., Алтухов А. Ю., 2024

Для цитирования: Бобырь М.В., Бондаренко Б. А., Алтухов А. Ю. Построение интеллектуальных функций принадлежности и реализация нечетко-логического вывода на их основе // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №2. С. 166-183. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-166-183>.

Поступила в редакцию 19.04.2024

Подписана в печать 10.05.2024

Опубликована 25.06.2024

Intellectualization of the process of constructing membership functions and implementation of fuzzy logical inference based on them

Maksim V. Bobyr ¹ ✉, Bogdan A. Bondarenko ¹, Alexander Yu. Altukhov ¹

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: maxbobyr@gmail.com

Abstract

Purpose of research. The method proposed in this work is aimed at increasing the speed and accuracy of the computational process of training a fuzzy logic system. The developed parameterized membership functions were used as the subject of the study. The effectiveness indicator was the impact of changing the labels of input membership functions, created by the traditional method and using parameterized membership functions, on the output characteristic.

Methods. A method has been developed and implemented for constructing parametric membership functions that are used in the process of fuzzy logic inference fuzzification. In addition to fuzzification, the system implements fuzzy inference and defuzzification. Triangular membership functions were used in the fuzzification process. As a compositional rule, 6 activated degrees of membership were used, combined on the basis of Zadeh's compositional rule into 5 conclusions of fuzzy logical inference. At the defuzzification stage, a simplified center of gravity method was used. The object of the study was fuzzy logical inference using traditional and parameterized membership functions synthesized at the fuzzification stage.

Results. A mathematical model of fuzzy inference with implemented parameterized membership functions at the fuzzification stage is obtained. Based on the experiment, it was concluded that the proposed model has a smoother resulting surface when one parameter of the input membership function changes. In this case, the condition for the division of unity is ensured.

Conclusion. A mathematical model of fuzzy inference with implemented parameterized membership functions at the fuzzification stage is obtained. Based on the experiment, it was concluded that the proposed model has a smoother resulting surface when one parameter of the input membership function changes. In this case, the condition for the division of unity is ensured.

Keywords: intellectualization; membership function; fuzzy logic; fuzzy logical inference; parameterization.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding. The work was carried out with financial support from the State Assignment (project No. 0851-2020-0032).

For citation: Bobyr M. V., Bondarenko B. A., Altukhov A. Yu. Intellectualization of the process of constructing membership functions and implementation of fuzzy logical inference based on them. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(2): 166-183 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-166-183>.

Received 19.04.2024

Accepted 10.05.2024

Published 25.06.2024

Введение

Механизмы нечетких рассуждений используются, когда невозможно принять решение в рамках классической логики. Они обеспечивают наиболее эффективное решение сложных задач, легко модифицируются и позволяют решать проблемы, связанные с инженерной неопределенностью.

В работах [1-6] приводятся некоторые примеры параметризации функций принадлежности, используемые при построении нейро-нечетких систем для решения задач управления сложными объектами. Как показано в результатах экспериментов, модель центра тяжести [7] при использовании мягких арифметических операций в нечетком выводе позволяет получить более гладкую поверхность отклика результирующей переменной, а также обладает свойством непрерывности.

В исследованиях [8-12] представлены полученные адаптированные функции принадлежности из их канонического выражения для различных требований к диагностируемым объектам. При этом требования выражены рядом выпуклых, вогнутых, логистических функций отображения равномерных универсальных шкал на деформированные универсальные шкалы. Полученные выражения адаптированных функций принадлежности удобны для инженерной практики, так как содержат параметры, ко-

торые можно задать и оценить их влияние на количество вычислительных операций в процессе фаззификации [13-14].

В трудах [15-19] проведен анализ известных методов и моделей представления нечетких чисел в базах данных информационных систем. Рассмотрены и проанализированы известные методы построения функций принадлежности. Предлагается использовать данные из внешних источников для определения ядра нечеткого множества, где в качестве носителей используются теоретические знания об объекте. Предлагается, что связь между ядром и носителями нечеткого множества определяет вид функции принадлежности. Значения параметров изменяются в зависимости от необходимости учета реального набора данных или требования упростить автоматизированную процедуру. Предложено хранить нечеткие числа с типовыми функциями принадлежности в виде строки, содержащей значения для точек перелома, а нечеткие числа с произвольной функцией принадлежности – в виде строки, содержащей коэффициенты функции аппроксимации. Предложенный метод может быть применен в системах поддержки принятия решений и системах автоматического управления технологическими процессами.

В данной статье предложен метод интеллектуализации этапа фаззификации, отличительной чертой которого является использование меньшего количества ме-

ток функций принадлежности и обеспечение условия разбиения единицы, вследствие чего увеличивается быстродействие системы.

Материалы и методы

Разработанная нечетко-логическая система (рис. 1) предназначена для работы с обучающимися системами, использующими компьютерное зрение, например, для использования в задачах определения трафика как автомобилей, так и пешеходов на регулируемом пешеходном переходе [20].

Модель, рассмотренная в данной статье, реализована с помощью нечеткой MISO-системы, состоящей из следующих блоков: «SignalGenerator», «MF Labels», «MF1», «MF2», «MF3», «Compos» и «Def-
fuzz».

uzz». Назначение каждого блока описано ниже. Работа данной системы заключается в последовательности далее описанных шагов.

На первом шаге работы системы происходит формирование функций принадлежности. Входные переменные нечеткой MISO-системы задаются треугольными функциями принадлежности. Для их построения на вход системы необходимо подать сигнал с любой внешней системы, например системы компьютерного зрения, а также задать метки вершин функций принадлежности.

Моделирование входящего сигнала для предложенной системы выполняется в блоке «SignalGenerator» и показано на рис. 2.

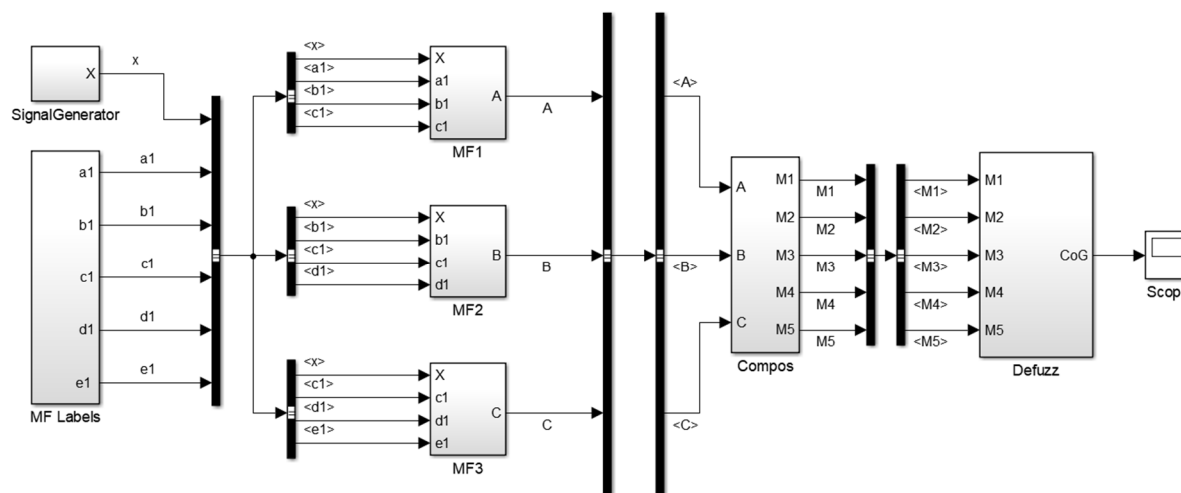


Рис. 1. Разработанная нечетко-логическая система

Fig. 1. Developed fuzzy logic system

В стандартном варианте построения треугольных функций [21] принадлежности требуется указывать по 3 метки вер-

шин треугольника для каждой функции, и рассчитывается по формуле:

$$\mu(x,a,b,c)=\begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & \text{если } a < x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{если } b < x < c; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (1)$$

где x – входящий сигнал; a, b, c – метки треугольной функции, которые подби-

раются в зависимости от требуемого вида функции принадлежности и диапазона значений входных переменных системы управления.

Для построения 3 функций принадлежности использовались 9 меток, сведенных в табл. 1.

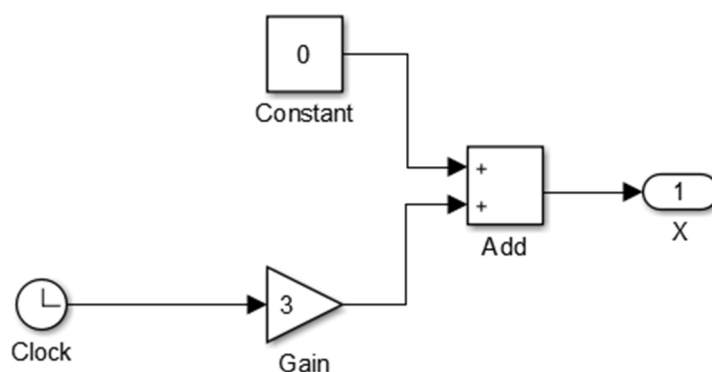


Рис. 2. Блок «SignalGenerator» в Simulink

Fig. 2. «SignalGenerator» block in Simulink

В процессе обучения нечетко-логической системы используется два способа. Первый – структурная адаптация, второй – параметрическая адаптация. К структурной адаптации относятся методы: добавления количества функций принадлежности, добавления количества нечетких правил или изменения метода дефазификации результирующей переменной. Для параметрической оптимизации используются следующие функции: изменение меток функции принадлежности, добавление весовых коэффициентов к нечетким правилам. В данной статье, для улучшения вычислительного процесса обучения нечетко-логической

системы, достаточно изменить положение меток функции принадлежности, причем у параметризованных функций принадлежности при изменении одной переменной меняются смежные функции принадлежности и при этом соблюдается условие разбиения единицы.

В предложенном методе интеллектуализации требуется указать только значения меток, обозначающих вершины функций принадлежности. Таким образом, используются только пять меток, которые ограничены логическими переменными $w1-w4$ (рис.4). Значения меток и границ вершин сведены в табл. 1.

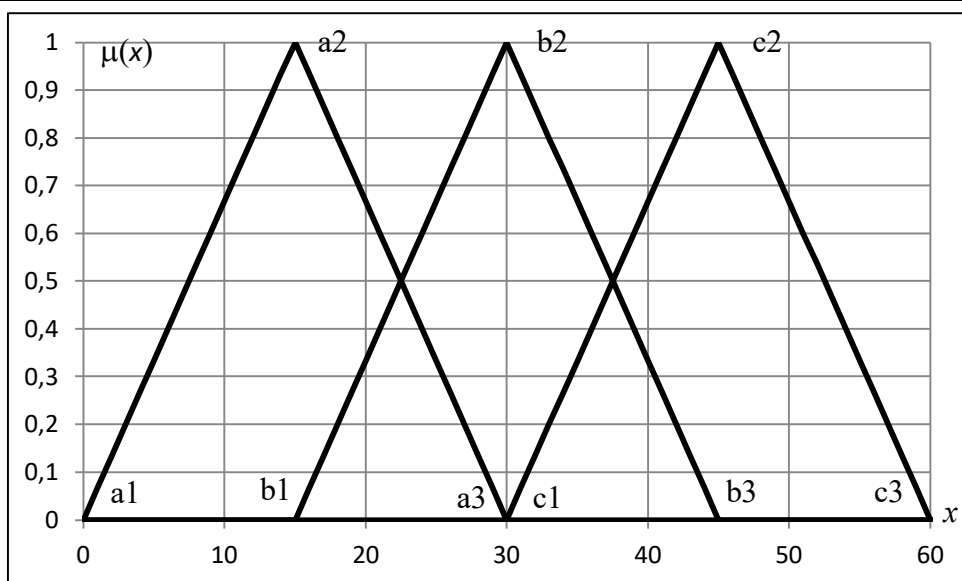


Рис. 3. Треугольные функции принадлежности, построенные стандартным методом

Fig. 3. Triangular membership functions constructed using the standard method

Таблица 1. Метки входных функций принадлежности метода интеллектуализации фаззификации

Table 1. Labels of input membership functions of the fuzzification intellectualization method

	ФП / FP	Значения меток / Label Values				
Традиционный метод	$\{A1\}=\{a1;a2;a3\}$	0	15	30		
	$\{B1\}=\{b1;b2;b3\}$	15	30	45		
	$\{C1\}=\{c1;c2;c3\}$	30	45	60		
Метод параметризации	$\{A2;B2;C2\}=\{a;b;c;d;e\}$	0	15	30	45	60
	Логическая переменная $\{w1;w2;w3;w4\}$	[0;15]	[15;30]	[30;45]	[45;60]	

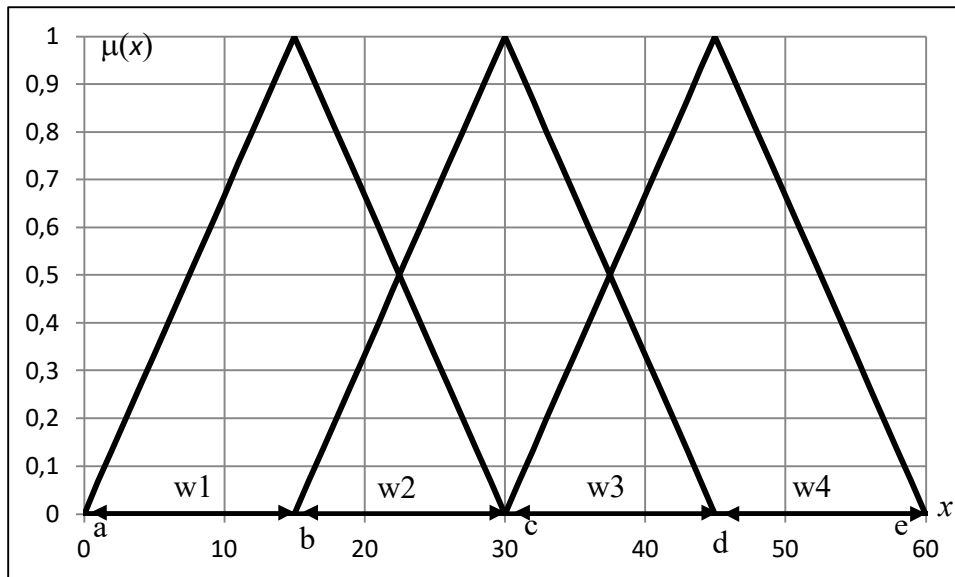


Рис. 4. Треугольные функции принадлежности, построенные методом интеллектуализации

Fig. 4. Triangular membership functions constructed by parameterization method

Для удобства расчета представим значения $w1$ - $w4$ в виде булевой переменной. Следовательно, они будут иметь значение либо 0, либо 1. Расчет логических переменных $w1$ - $w4$ производится по формулам:

$$w1 = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in [a;b]; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2)$$

$$w2 = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in [b;c]; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (3)$$

$$w3 = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in [c;d]; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (4)$$

$$w4 = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in [d;e]; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (5)$$

где x – входящий сигнал; переменные a, b, c, d, e – метки входных функций принадлежности.

Далее выведем и составим общую формулу расчета функций принадлежности методом интеллектуализации для трех треугольных функций принадлежности:

$$\mu(x, a, b, c, d, e) = w1 \frac{x-a}{b-a} + w2 \frac{c-x}{c-b} + w2 \frac{x-b}{c-b} + w3 \frac{d-x}{d-c} + w3 \frac{x-c}{d-c} + w4 \frac{e-x}{e-d}. \quad (6)$$

Преимуществом такого метода является автоматическое соблюдение условия разбиения единицы. Достаточно изменить одну метку, и функция сама рассчитает положение треугольных функций. Также, с помощью формулы (6), необходимо будет выполнить только 1 расчет, чтобы получить полную функцию принадлежности. В то время как с помощью формулы (1) придётся выполнять вычисления для каждой из трех функций принадлежности по отдельности.

Реализация этапа задания меток вершин функций принадлежности происходит в блоке «MF Labels» и показана на рис. 5. Расчет треугольных функций принадлежности в Simulink происходит в блоках «MF1», «MF2», «MF3». На рис. 6 показан блок «MF1». Вычисления в блоках «MF2» и «MF3» проводятся аналогично, заменяются только входящие переменные.

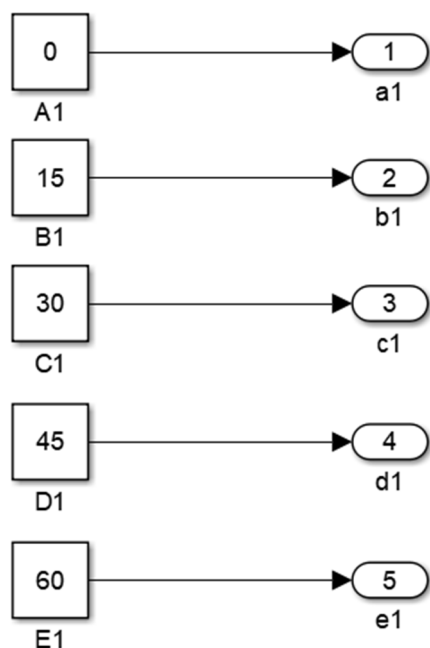


Рис. 5. Блок «MF Labels» в Simulink

Fig. 5. «MF Labels» block in Simulink

На следующем шаге системы производится формирование нечётких правил. Нечеткие правила задаются в виде:

If $\mu(A)$ and $\mu(B)$ and $\mu(C)$, Then M_n , (7)

где $\mu(A)$ – значение первой функции принадлежности; $\mu(B)$ – значение второй функции принадлежности; $\mu(C)$ – значение третьей функции принадлежности; M_n – результирующее значение.

Формируется база правил данной модели. Модель насчитывает пять правил, отображенных в табл. 2.

Формирование нечетких правил реализовано методом жестких минимумов и вычисляется в блоке «Compos», который показан на рис. 7.

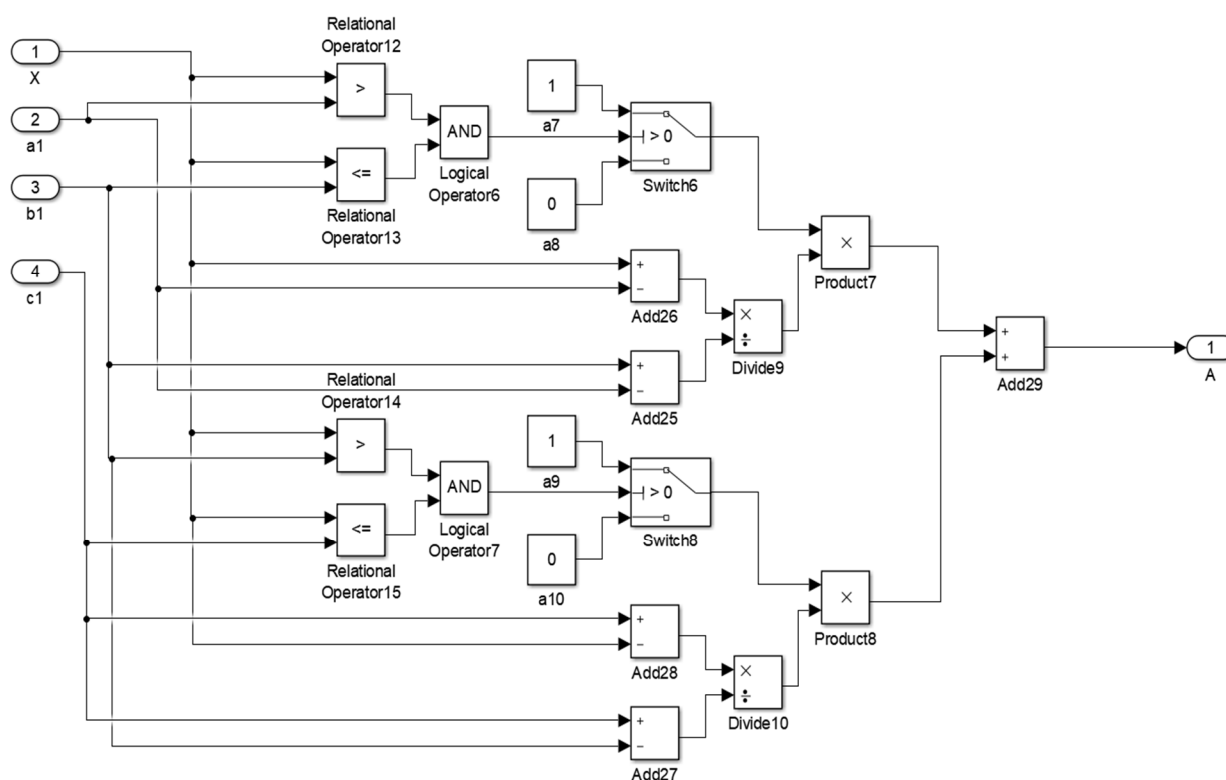
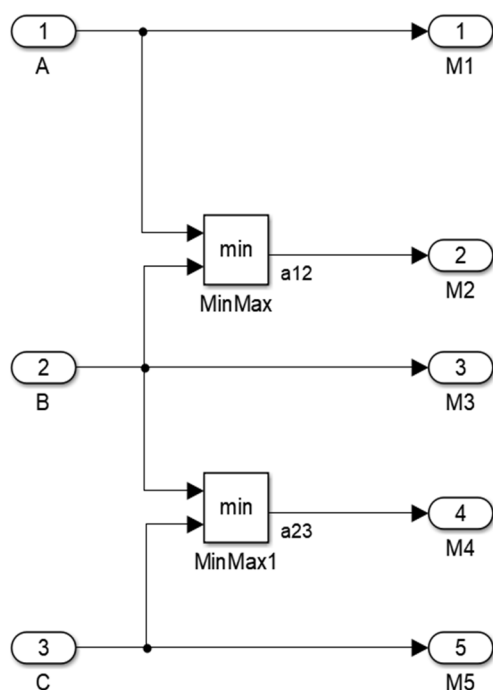


Рис. 6. Блок «MF1» в Simulink

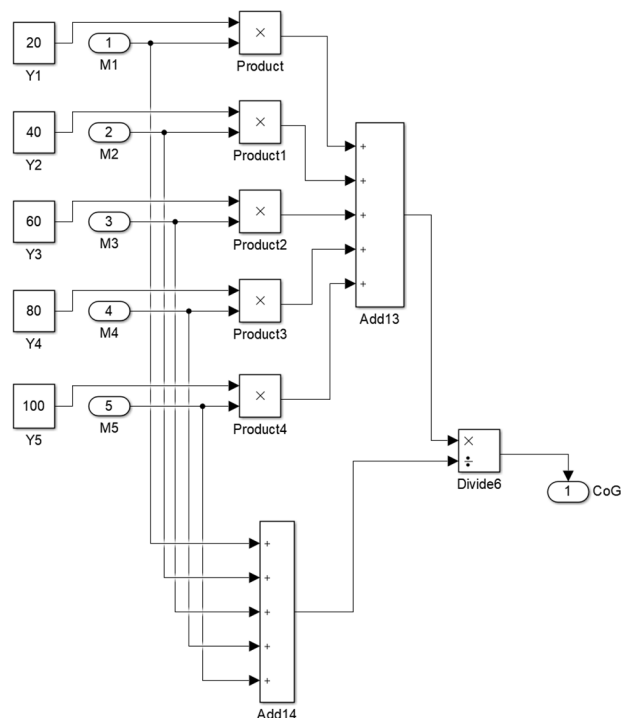
Fig. 6. «MF1» block in Simulink

Таблица 2. База правил нечетко-логической модели**Table 2.** Fuzzy logic model rule base

1	$M1=A$
2	$M2=(\min(A,B))$
3	$M3=B$
4	$M4=(\min(B,C))$
5	$M5=C$

**Рис. 7.** Блок «Compos» в Simulink**Fig. 7.** «Compos» block in Simulink

Завершающий этап работы рассматриваемой системы заключается в вычислении точных значений или дефазификации, что обеспечивает получение четкой формы представления выходного значения нечеткой системы. Вычисления этапа дефазификации в Simulink реализованы в блоке «Defuzz» и отображены на рис. 8.

**Рис. 8.** Блок «Defuzz» в Simulink**Fig. 8.** «Defuzz» block in Simulink

В рассматриваемой нечетко-логической используется упрощенный метод центра тяжести, в котором выходные переменные задаются синглтонной функцией принадлежности $\{Y\}=\{y_1;y_2;y_3;y_4;y_5\}=\{20;40;60;80;100\}$ (рис. 10), вычисляемой по формуле

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n M_i Y_i}{\sum_{i=1}^n M_i}, \quad (8)$$

где $\sum_{i=1}^n M_i Y_i$ – сумма произведения результирующих значений нечетких правил и выходных функций; $\sum_{i=1}^n M_i$ – сумма результирующих значений нечетких правил.

Результаты и их обсуждение

Для проведения вычислительного эксперимента сформируем три случая с разными значениями меток вершин функ-

ций принадлежности. Данные для меток принадлежности сведены в табл. 3.

Вычислительный эксперимент проводился на оборудовании со следующими параметрами: процессор Intel Core i7-12700K 3.60 GHz; оперативная память 32,0 ГБ, операционная система

64-разрядная операционная система Windows 11 Pro. В ходе эксперимента выполнялись 20 итераций, следовательно сигнал $X \in [0;60]$.

Результат формирования функций принадлежности отображен на рис. 9 для всех 3 случаев.

Таблица 3. Метки входных функций принадлежности

Table 3. Labels of input membership functions

Функции принадлежности / Accessory functions			
	1 случай	2 случай	3 случай
A	0	0	0
B	15	25	5
C	30	30	30
D	45	35	55
E	60	60	60

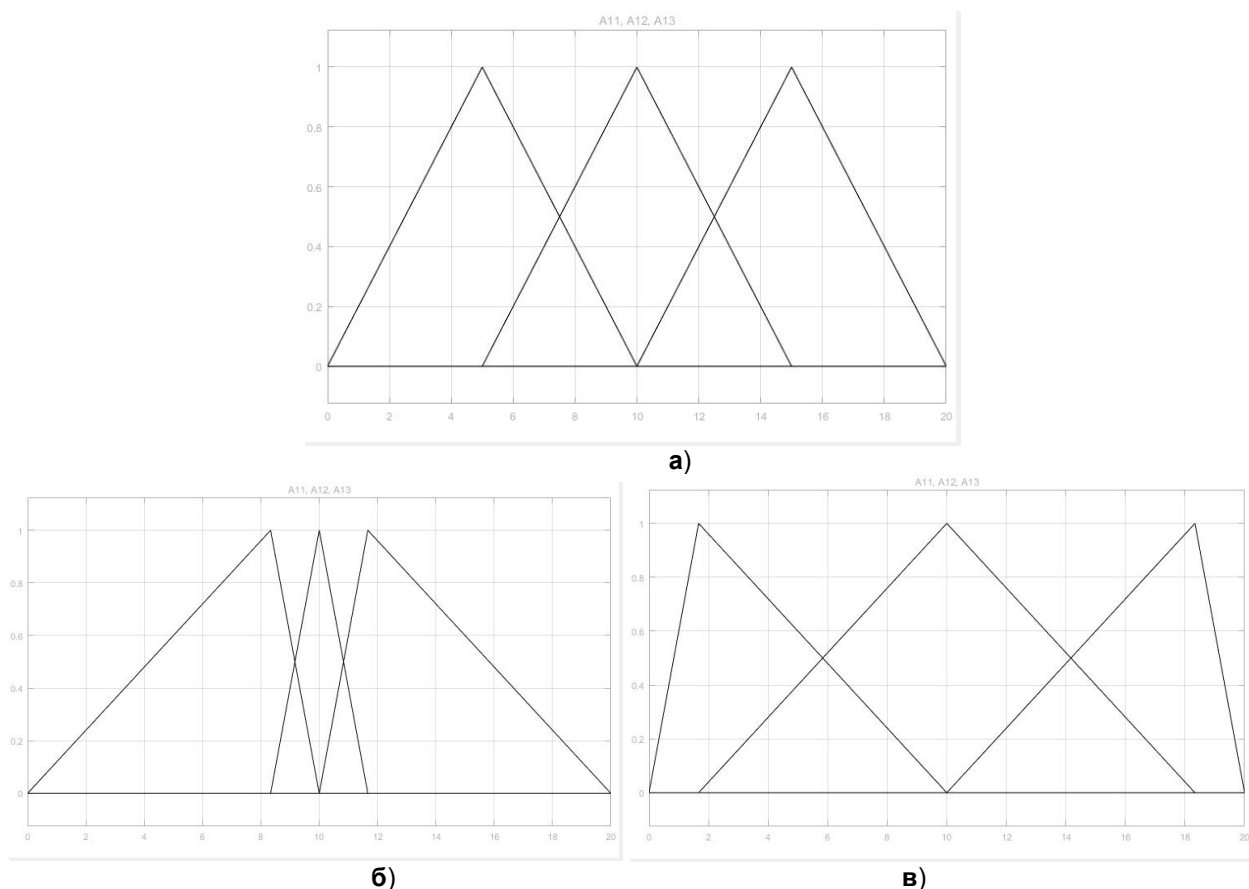


Рис. 9. Функции принадлежности: а – первый случай; б – второй случай; в – третий случай

Fig. 9. Membership functions: а – first case; б – second case; в – third case

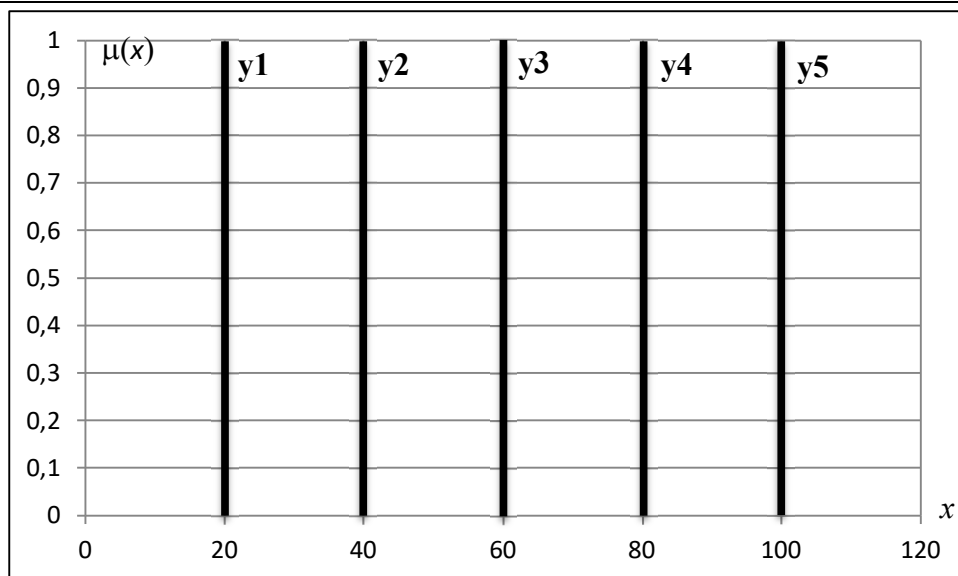


Рис. 10. Выходные функции принадлежности

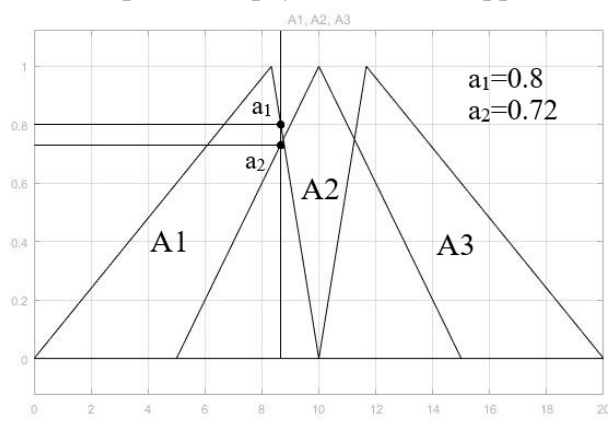
Fig. 10. Output membership functions

Выходные функции принадлежности неизменны и показаны на рис. 10 и имеют значения: $y1[20]$, $y2[40]$, $y3[60]$, $y4[80]$, $y5[100]$.

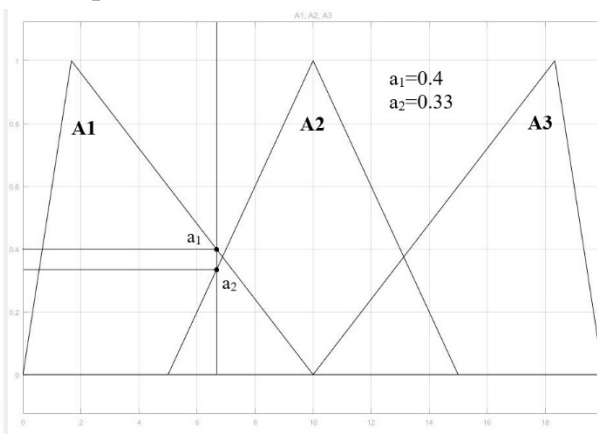
При анализе результата с метками входных функций принадлежности стоит отметить, несмотря на то, что задаются лишь вершины треугольных функций, нижние границы треугольников коррект-

но реагируют на изменения вершин треугольников, соблюдая условие разбиения единицы.

Для сравнения результатов построены треугольные функции принадлежности традиционным способом, опираясь на 2 и 3 случаи, показанные на рис. 9. Результат традиционных расчетов показан на рис. 11.



а)



б)

Рис. 11. Функции принадлежности, построенные стандартным методом: **а** – второй случай, **б** – третий случай

Fig. 11. Membership functions constructed using the standard method: **а** – second case; **б** – third case

При изменении вершин треугольников A_1 и A_3 (см. рис. 11), остальные метки принадлежности остаются без изменения. При пересечении прямой образуются точки: $a_1=0.8$ и $a_2=0.72$ (рис.11, а) и $a_1=0.4$ и $a_2=0.33$ (рис.11, б). Сумма значений $\sum a_i = a_1 + a_2 = 1.52 \neq 1$ для второго случая (рис.11, а) и $\sum a_i = a_1 + a_2 = 0.73 \neq 1$ для третьего случая (рис.11, б), что нарушает условие разбиения единицы. Вследствие чего это может сказаться на точности результирующей переменной. Также стоит отметить, что для расчета входных функций принадлежности понадобилось провести три

вычисления, для каждой из треугольных функций. В то время как функции, показанные на рис. 9, были рассчитаны одним вычислением.

Следующие два шага не отличаются для каждой из систем. Композиционное правило Заде и дефаззификация выполняется в точности как было описано ранее.

В результате дефаззификации рассчитывается единое четкое значение по заданным переменным. Все получаемые значения в зависимости от входящего сигнала отображаются в виде графиков чувствительности системы, показанных на рис. 12.

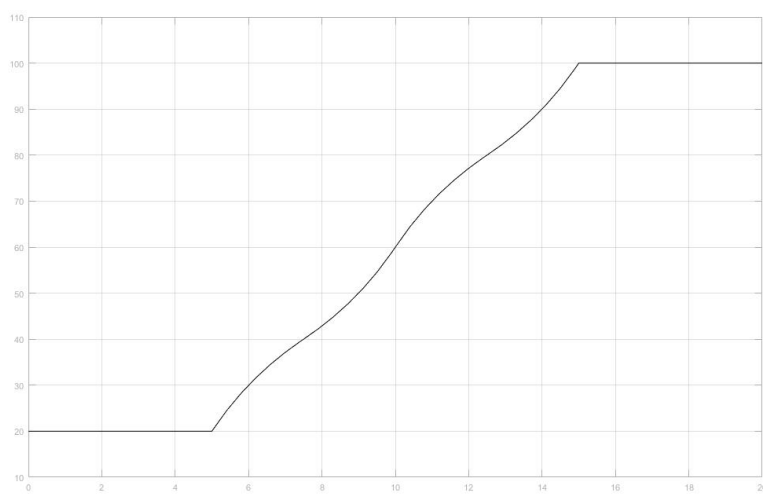


Рис. 12. Результаты работы нечетко-логической системы: первый случай

Fig. 12. Results of the fuzzy logic system: first case

Рассмотрим результаты работы нечетко-логической системы при стандартном методе фаззификации (рис. 13), данные для которой задавались на рис. 11. Для сравнения, на рисунках (рис. 13, а) и (рис. 13, б) изображена работа системы с функциями принадлежности, построенными методом параметризации

(отмечены цифрой 1) и традиционным методом (отмечены цифрой 2).

Анализируя результирующие данные, выделяется главный недостаток представленного метода параметризации функций принадлежности, а именно нечувствительность системы на границах значений сигнала.

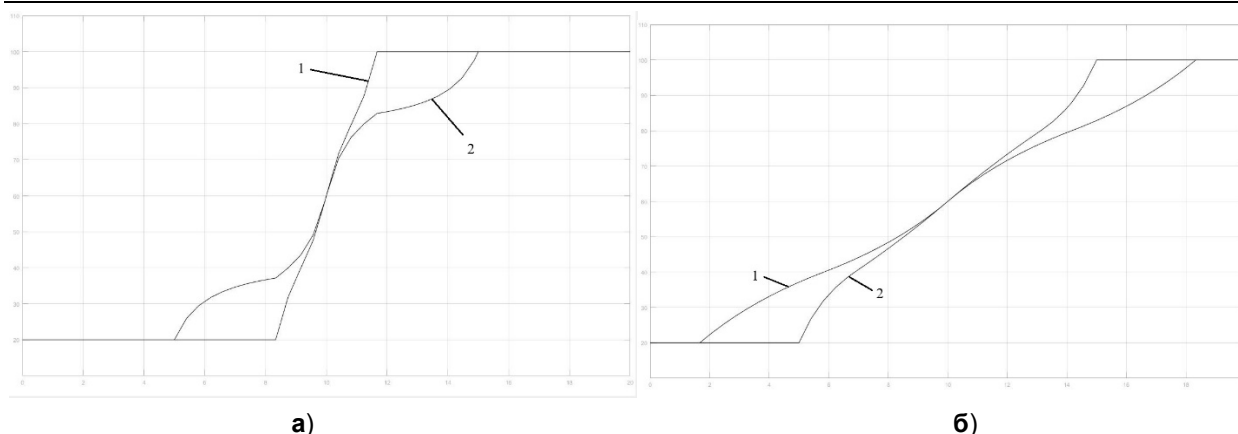


Рис. 13. Сравнение результатов работы нечетко-логической системы с методом параметризации и стандартном методе фаззификации: **а** – второй случай, **б** – третий случай

Fig. 13. Comparison of the results of a fuzzy logic system with the parameterization method and the standard fuzzification method: **a** – second case, **b** – third case

Однако рассмотренный метод имеет ряд преимуществ. Во-первых, чувствительная зона сигнала имеет более ровную и гладкую поверхность, что говорит о точности вычисляемых данных. Также гладкость обеспечивается соблюдением условия разбиения единицы. При сравнении с результатами работы системы (см. рис. 13), использующей стандартный метод формирования функций принадлежности, видно, что при работе с традиционным методом, результирующая кривая имеет ломаные линии, в то время как в предложенном методе кривая гладкая. Во-вторых, использование меньшего числа переменных при формировании функций принадлежности, что позволяет работать в условиях ограниченных данных. Также отпадает необходимость в регуляции всех трех меток вершин, в случае использования треугольных функций принадлежности, что оптимизирует работу системы.

Выводы

Разработана нечеткая логическая MISO-система на основе нечеткого вывода Мамдани с использованием метода параметризации на этапе фаззификации при формировании функций принадлежности. Система реализована в среде моделирования Simulink. Описаны различия между стандартным вариантом построения функций и методом интеллектуализации. Построены графики результатов дефаззификации для 3 вариантов представления функций принадлежности ранее описанным методом. Проведено сравнение с традиционным методом формирования. Выделены преимущества и недостатки описанного метода.

В итоге, результаты экспериментов показывают, что при использовании предложенного метода система работает более точно. Также увеличивается скорость ее работы из-за оптимизации настройки на этапе формирования функций принадлежности.

Список литературы

1. Бобырь М. В., Нассер А. А. Параметризация функций принадлежности в нечетко-логическом выводе // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов. 2016. Т. 1, № 6. С. 287-291. EDN VZDVXL.
2. Bobyr M.V., Yakushev A.S., Dorodnykh A.A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA // Measurement. 2020. Vol. 152. P. 107378. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107378>.
3. Bobyr M.V., Emelyanov S.G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems // Applied Soft Computing. 2020. Vol. 88. P. 106030. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.106030>.
4. Бобырь М.В., Архипов А.Е., Якушев А.С. Распознавание оттенка цветовой метки на основе нечёткой кластеризации // Информатика и автоматизация. 2021. № 2 (20). С. 407-434.
5. Титов В.С., Бобырь М.В., Анциферов А.В. Алгоритм высокоскоростной обработки деталей на основе нечеткой логики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 6. С. 21-26.
6. Bobyr' M.V., Titov V.S., Nasser A.A. Automation of the cutting-speed control process based on soft fuzzy logic computing // J. Mach. Manuf. Reliab. 2015. 44. P.633–641. <https://doi.org/10.3103/S1052618815070067>
7. Leekwijck W.V., Kerre E.E. Defuzzification: criteria and classification // Fuzzy Sets Syst. 1999. № 108. P. 159–178.
8. Усков А.А. Системы с нечеткими моделями объектов управления. Смоленск: СФРУК, 2013. 153 с.
9. Рыжаков В. В., Рыжаков М. В. Функции принадлежности элементов нечетких множеств на универсальных шкалах, адаптированных различными функциями отображения // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2009. № 3. С. 93-97. EDN KKNUMT.
10. Попова Ю. Б., Бураковский А. И. Характеристические функции нечетких множеств в обучающих системах на примере трапецеидальной функции принадлежности // Информационные технологии в технических и социально-экономических системах : сборник материалов научно-технической конференции, Минск, 22 апреля 2016 года. Минск: Республиканский институт высшей школы, 2016. С. 3-5. EDN IEKRWA.
11. Изосимов С. Д. Методика определения функций принадлежности для аппроксимации периодических функций нечеткими множествами // Молодой ученый. 2015. № 6(86). С. 164-168. EDN TNBZGZ.

12. Поспелов Д.А. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 312 с.
13. Сергиенко М. А. Методы проектирования нечеткой базы знаний // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2008. № 2. С. 67-71. EDN KHNZGN.
14. Бизянов Е. Е. Имплементация нечетких моделей в информационные системы экономических объектов // Экономика и менеджмент инновационных технологий. 2015. № 4-1(43). С. 67-71. EDN TUIYPD.
15. Бизянов Е. Е., Гутник А. А. Метод получения и хранения параметров функций принадлежности нечетких множеств // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. 2020. № 3(8). С. 22-28. [https://doi.org/10.26731/2658-3704.2020.3\(8\).22-28](https://doi.org/10.26731/2658-3704.2020.3(8).22-28). EDN ARXOPX.
16. Милостная Н. А. Исследование устойчивости нейро-нечёткой системы вывода, основанной на методе отношения площадей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25, №3. С. 70-85. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-70-85>.
17. Применение алгоритма нечеткой логики Мамдани для отбора игроков в футбольный клуб на предсезонных сборах / С. Т. Дусакаева, И. А. Хохлов, П. Л. Нирян, М. П. Носарев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4(76). С. 228-237. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.4\(76\).228-237](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.4(76).228-237). EDN EHPOJ.
18. Adriyendi. Fuzzy Logic using Tsukamoto Model and Sugeno Model on Prediction Cost // International Journal of Intelligent Systems and Applications. 2018. Vol. 10, no. 6. P. 13-21.
19. Милостная Н. А. Быстродействующие дефаззификаторы, основанные на методе отношения площадей // Промышленные АСУ и контроллеры. 2021. № 11. С. 18-25.
20. Бобырь М. В., Храпова Н. И., Ламонов М. А. Система управления интеллектуальным светофором на основе нечеткой логики // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25, №4. С. 162-176. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-162-176>.
21. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление: [пер. с англ.]. 2-е изд. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 798 с.

References

1. Bobyr M. V., Nasser A. A. Parameterization of membership functions in fuzzy logical inference. *Mnogoyadernye protsessory, parallel'noe programmirovaniye, PLIS, sistemy obrabotki signalov = Multi-core processors, parallel programming, FPGAs, signal processing systems*. 2016; 1 (6): 287-291. (In Russ.). EDN VZDVXL.

2. Bobyr M.V., Yakushev A.S., Dorodnykh A.A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA. *Measurement*. 2020; 152: 107378. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107378>.

3. Bobyr M.V., Emelyanov S.G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems. *Applied Soft Computing*. 2020; 88: 106030. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.106030>.

4. Bobyr M.V., Arkhipov A.E., Yakushev A.S. Color mark shade recognition based on fuzzy clustering. *Informatika i avtomatizatsiya = Computer Science and Automation*. 2021; (2): 407-434. (In Russ.).

5. Titov V.S., Bobyr M.V., Antsiferov A.V. Algorithm for high-speed parts processing based on fuzzy logic. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*. 2012; (6): 21-26. (In Russ.).

6. Bobyr' M.V., Titov V.S., Nasser A.A. Automation of the cutting-speed control process based on soft fuzzy logic computing. *J. Mach. Manuf. Reliab.* 2015; 44: 633–641. <https://doi.org/10.3103/S1052618815070067>

7. Leekwijck W.V., Kerre E.E. Defuzzification: criteria and classification. *Fuzzy Sets Syst.* 1999; (108): 159–178.

8. Uskov A.A. Systems with fuzzy models of control objects. Smolensk: SFRUK, 2013; 153 p. (In Russ.).

9. Ryzhakov V.V., Ryzhakov M.V. Membership functions of elements of fuzzy sets on universal scales adapted by various mapping functions. *Oboronnyi kompleks - nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii = Defense Complex - Scientific and Technical Progress of Russia*. 2009; (3): 93-97. (In Russ.). EDN KKNUMT.

10. Popova Yu. B., Burakovsky A. I. Characteristic functions of fuzzy sets in learning systems using the example of a trapezoidal membership function. In: *Informatsionnye tekhnologii v tekhnicheskikh i sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh: sbornik materialov nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = Information technologies in technical and socio-economic systems: collection of materials of a scientific and technical conference*. Minsk: Republican Institute of Higher School; 2016. P. 3-5. (In Russ.). EDN IEKRWA.

11. Izosimov S. D. Methodology for determining membership functions for approximation of periodic functions by fuzzy sets. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*. 2015; (6): 164-168. (In Russ.). EDN TNBZGZ.

12. Pospelov D.A. Fuzzy sets in control and artificial intelligence models. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit.; 1986. 312 p. (In Russ.).

13. Sergienko M. A. Methods for designing a fuzzy knowledge base. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii* = *Bulletin of Voronezh State University. Series: System analysis and information technologies*. 2008; (2): 67-71. (In Russ.). EDN KHNZGN.
14. Bizyanov E. E. Implementation of fuzzy models in information systems of economic objects. *Ekonomika i menedzhment innovatsionnykh tekhnologii* = *Economics and management of innovative technologies*. 2015; (4-1): 67-71. (In Russ.). EDN TUIYPD.
15. Bizyanov E. E., Gutnik A. A. Method for obtaining and storing parameters of membership functions of fuzzy sets. *Informatsionnye tekhnologii i matematika-ticheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami* = *Information technologies and mathematical modeling in the management of complex systems*. 2020; (3): 22-28. (In Russ.). [https://doi.org/10.26731/2658-3704.2020.3\(8\).22-28](https://doi.org/10.26731/2658-3704.2020.3(8).22-28). EDN ARXOPX.
16. Milostnaya N. A. Stability Study of a Neuro-Fuzzy Output System Based on Ratio Area Method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(3): 70-85 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-70-85>.
17. Dusakaeva S. T., Khokhlov I. A., P Niryan. L., Nosarev M. P. Application of the Mamdani fuzzy logic algorithm for selecting players for a football club at pre-season training camps. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* = *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2022; (4): 228-237. (In Russ.). [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.4\(76\).228-237](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.4(76).228-237). EDN EHIPOJ.
18. Adriyendi. Fuzzy Logic using Tsukamoto Model and Sugeno Model on Prediction Cost. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2018; 10 (6): 13-21.
19. Milostnaya N.A. High-speed defuzzifiers based on the area ratio method. *Promyshlennyye ASU i kontroly* = *Industrial automated control systems and controllers*. 2021; (11): 18-25. (In Russ.).
20. Bobyr M.V., Khrapova N. I., Lamonov M. A. Smart Traffic Light Control System Based on Fuzzy Logic. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 162-176 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-162-176>.
21. Pegat A. Fuzzy modeling and control. 2nd ed. Moscow: BINOM. Laboratory of knowledge, 2013; 798 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Бобырь Максим Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: fregat_mn@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5400-6817>, Researcher ID: G-2604-2013

Maxim V. Bobyr, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Computer Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: fregat_mn@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5400-6817>, Researcher ID: G-2604-2013

Бондаренко Богдан Андреевич, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sikersinko@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5415-9015>, Researcher ID: HGV-0751-2022

Bogdan A. Bondarenko, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sikersinko@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5415-9015>, Researcher ID: HGV-0751-2022

Алтухов Александр Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alt997@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2292-2092>, Researcher ID: N-4597-2016.

Alexander Yu. Altukhov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Materials and Transport Technology Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: alt997@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2292-2092>, Researcher ID: N- 4597-2016

К сведению авторов

1. К публикации в журнале «Известия Юго-Западного государственного университета» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2. Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

- статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;

- разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа.

- сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);

- лицензионный договор.

3. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами.

4. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

5. Публикация бесплатная.

6. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны – 2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

7. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (строчные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, список литературы. Авторы, название, аннотация и ключевые слова, список литературы приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается аннотация (200-250 слов), отражающая краткое содержание статьи.

8. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.

9. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный – 12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс – 5 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора – 75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы (Ω , η , β , μ , ω , ν и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций ($\sin$, $\cos$, $\tan$ и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – прямым шрифтом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF, JPEG, PNG) с разрешением не ниже 300 dpi и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. **Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы.**

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания **не допускаются.**

12. **Список литературы к статье обязателен** и должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы (не менее 10). Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 22-25-26, тел/факс (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Изменения и дополнения к правилам оформления статей и информацию об опубликованных номерах можно посмотреть на официальном сайте журнала: <https://science.swsu.ru>.