

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия
Юго-Западного
государственного
университета

Научный журнал

Том 27 № 3 / 2023



Proceedings
of the Southwest
State University

Scientific Journal

Vol. 27 № 3 / 2023



**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, доцент; 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, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, 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, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

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

Латыпов Рашид 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, 2023



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 28.10.2023.
Дата выхода в свет 29.12.2023. Формат 60x84/8.
Бумага офсетная. Усл.печ.л. 17.6.
Тираж 1000 экз. Заказ 76.

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), Associate 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. Bulychev, 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, Southwest State University (Kursk, 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, Southwest State University (Kursk, 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, 2023



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

Singed to print 28.10.2023.
Release date 29.12.2023. Format 60x84/8.
Offset paper. Printer's sheets 17,6.
Circulation 1000 copies. Order 76.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

Analysis and Comparison of Obstacle Avoidance Algorithms for Mobile Robots.....	8
<i>Gutierrez Suquillo N. R., Paredes R., Bezmen P. A.</i>	

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

Напряженно-деформированное состояние пологой оболочки на упругом основании с переменными прочностными характеристиками	21
<i>Колесников А. Г., Иванов А. А.</i>	

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

Система технического зрения в задаче определения расстояний от видеокамеры до объекта.....	34
<i>Бобырь М.В., Емельянов С.Г., Милостная Н.А.</i>	
Разработка эргономичного приложения-помощника на основе нейронной сети.....	52
<i>Савенков Д.С., Поздняков С.Ю., Кузьменко А.А., Филиппов Р.А., Филиппова Л.Б.</i>	
Математическая интерпретация результатов когнитивного анализа метаданных сетевых пакетов	66
<i>Таныгин М.О., Добрица В.П., Митрофанов А.В., Ахмат Х.И.</i>	
Метод динамического формирования изображений HUD дисплея для наземных автономных робототехнических средств	79
<i>Заикин М.И., Летенков М.А., Камынин К.В., Астапова М.А.</i>	
Вибротранспортирующее устройство в составе автоматизированного сборочного комплекса	97
<i>Мальчиков А.В., Емельянова О.В., Политов Е.Н., Марченко В.В.</i>	
Моделирование испытательного стенда конструктивных элементов органов управления самолета	111
<i>Яцун С.Ф., Мальчиков А.В., Яцун А.С., Субботин Е.В.</i>	
Оценка нагрузки протоколов обмена данными для БПЛА на базе интеллектуальных компонентов	128
<i>Черный С. Г., Шипаренко Н.В., Чупаков М.В.</i>	
К сведению авторов	152

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

Analysis and Comparison of Obstacle Avoidance Algorithms for Mobile Robots.....8

Gutierrez Suquillo N. R., Paredes R., Bezmen P. A.

CONSTRUCTION

Original articles

Stress-Strain State of Shallow Shell in an Elastic Foundation with Variable Strength Characteristics21

Kolesnikov A. G., Ivanov A. A.

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

Vision System in the Task of Determining Distances from the Vide Camera to the Object34

Bobyry M. V., Emelyanov S. G., Milostnaya N. A.

Development of an Ergonomic Assistant Application Based on a Neural Network52

Savenkov D. S., Pozdnyakov S. Yu., Kuzmenko A. A., Filippov R. A., Filippova L. B.

Mathematical Interpretation of the Results of Cognitive Analysis of Network Packet Metadata.....66

Tanygin M. O., Dobritsa V. P., Mitrofanov A. V., Ahmat K. I.

Dynamic HUD Imaging Method for Ground Autonomous Robotics79

Zaikin M. I., Letenkov M. A., Kamynin K. V., Astapova M.A..

Vibration Transporting Device as Part of an Automated Assembly Complex.....97

Mal'chikov A. V., O Emelyanova. V., Politov E.N., Marchenko V.V.

Simulation of the Test Bench of Structural Elements of Aircraft Controls..... 111

Yatsun S. F., Mal'chikov A. V., Yatsun A. S., Subbotin E. V.

Assessment of Data Exchange Protocol Workload in Uavs on Intelligent Components 128

Cherny S. G., Shiparenko N. V., Chupakov M. V.

Information of the authors 152

Analysis and Comparison of Obstacle Avoidance Algorithms for Mobile Robots

N. R. Gutierrez Suquillo ¹, R. Paredes ¹, P. A. Bezmen ² ✉

¹ Universidad UTE
Rumipamba, Quito 170147, Ecuador

² Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: pbezmen@yahoo.com

Abstract

Purpose of research. Mobile robotics is a discipline of great interest today due to the wide range of applications for which it has potential for; ranging from industry, services, military, to space exploration. One of the most challenging aspects in the development of this technology is the implementation of accurate and efficient navigation and positioning systems, since this function will ensure the autonomous operation of this equipment, providing flexibility and reliability in the tasks to which these mechanisms are assigned to. In this research work, an analysis and comparison of the performance and behavior of 5 different algorithms of obstacles evasion was made, with the implements of the navigation system from a differential drive mobile robot (MR), from an initial point to a target point.

Methods. Routes for MR take place within a structured map with various obstacles in its environment. The MR is modeled using the inverse kinematics equations provided by the robotics. In order to guarantee the expected behavior of the algorithms, this project started from the primordial logic of each one. Therefore, the sequence that each algorithm follows was analyzed and encoded using the MatLab software, since its Simulink plug-in is very useful and versatile for test simulations. For the tests, 10 routes were defined within the structured map, which was called the "test map". To obtain the results, each algorithm was used to guide the mobile robot through each of the defined routes evaluating the distance and time used for each of them.

Results. For the analysis and comparison of the different simulated algorithms, an evaluation of the time and distance traveled was carried out to comply with 10 test routes with obstacles.

Conclusion. Algorithms can be classified into two classes: global planification (GP) and local planification (LP). GP is characterized by planning the route to be followed by the mobile robot prior to its movement, while LP plans in real time the route to be followed by the MR, a route which is calculated and recalculated iteratively based on the information from the environment outside the robot that is collected by the sensors.

According to the results obtained, it can be concluded that LP algorithms have a superior performance to GP algorithms, so they are the most efficient for real applications. Although a correct combination of a GP algorithm with a LP could result in an optimal navigation system, which can overcome any type of obstacle and guide an MR efficiently through any type of environment no matter how complicated it is.

Keywords: mobile robot; navigation system; algorithm; obstacle avoidance; navigation routes; kinematics.

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

Funding. The paper was prepared with the support of the Strategic Project "Priority-2030. Creation of robotic tools to expand the functionality of a person".

For citation: Gutierrez Suquillo N. R., Paredes R., Bezmen P. A. Analysis and Comparison of Obstacle Avoidance Algorithms for Mobile Robots. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(3): 8-20 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-8-20>.

Received 26.07.2023

Accepted 30.08.2023

Published 28.10.2023

Анализ и сравнение алгоритмов обхода препятствий мобильными роботами

Н. Р. Гутьеррес Сукильо ¹, Р. Паредес ¹, П. А. Безмен ² ✉

¹ Университет UTE
Кампус Румипамба, Кито 170147, Эквадор

² Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: pbezmen@yahoo.com

Abstract

Цель исследования. Мобильная робототехника сегодня вызывает большой интерес из-за широкого спектра приложений, для которых она может быть использована; начиная от промышленности, услуг, вооруженных сил и заканчивая исследованием космоса. Одним из наиболее сложных аспектов в развитии этой технологии является внедрение точных и эффективных систем навигации и позиционирования, поскольку эти функции делают возможной автономную работу робототехники, обеспечивая гибкость и надежность в задачах, для которых предназначены мобильные роботы. В данной работе был проведен анализ и сравнение производительности и поведения 5 различных алгоритмов обхода препятствий с помощью средств навигационной системы мобильного робота (МР), оснащенного дифференциальным приводом, от начальной точки до целевой точки маршрута.

Методы. Маршруты для МР проходят по структурированной карте с различными препятствиями окружающей среды. МР моделируется с использованием уравнений обратной кинематики робота. Чтобы гарантировать ожидаемое поведение алгоритмов, данное исследование начиналось с изначального задания логики каждого из них. Поэтому последовательность действий, которой следует каждый алгоритм, была проанализирована и закодирована с помощью программного обеспечения MatLab, поскольку его подключаемый программный модуль Simulink универсален и подходит для данного тестового моделирования. Для тестов было определено 10 маршрутов в рамках структурированной карты, которая получила название «тестовая карта». Для получения результатов моделирования, каждый алгоритм использовался для направления движения мобильного робота по заданным маршрутам с оценкой расстояния и времени, затраченных на каждый из алгоритмов.

Результаты. Для анализа и сравнения различных смоделированных алгоритмов была проведена оценка времени и пройденного расстояния для 10 тестовых маршрутов с препятствиями.

Заключение. Алгоритмы можно разделить на два класса: глобальное планирование (ГП) и локальное планирование (ЛП). ГП выполняет планирование маршрута, по которому должен следовать мобильный робот, ещё до движения МР, в то время как ЛП в реальном времени выполняет построение маршрута, по которому должен следовать МР - данный маршрут рассчитывается и пересчитывается итеративно на основе информации, получаемой из внешней среды датчиками робота.

По полученным результатам можно сделать вывод, что алгоритмы ЛП имеют превосходящую производительность по сравнению с производительностью алгоритмов ГП, поэтому они являются наиболее эффективными для реальных приложений. Хотя правильная комбинация алгоритма ГП с алгоритмом ЛП может привести к созданию оптимальной навигационной системы, которая может преодолевать препятствия любого типа и эффективно направлять МР в любой среде, независимо от того, насколько она сложна.

Ключевые слова: мобильный робот; навигационная система; алгоритм; обход препятствий; навигационные маршруты; кинематика.

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

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Стратегического проекта «Приоритет-2030. Создание робототехнических средств для расширения функциональности человека»

Для цитирования: Гутьеррес Сукильо Н. Р., Паредес Р., Безмен П. А. Анализ и сравнение алгоритмов обхода препятствий мобильными роботами // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(3): 8-20. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-8-20>.

Поступила в редакцию 26.07.2023

Подписана в печать 30.08.2023

Опубликована 28.10.2023

Introduction

The concept of a robot has different meanings, one of the most accepted ones is defined by the International Organization for Standardization (ISO). The ISO 8373 standard defines a robot as: “a reprogrammable multifunctional manipulator, capable of moving materials, parts, tools or special devices, through programmed variable movements, for the performance of various tasks” [1].

Being a complex device, there are several ways to classify automata, among the most important are:

1. According to the type of actuators:
a. Pneumatic, b. Hydraulic and, c. Electric.

2. According to the type of control: a. Sequential, b. Trajectory-controlled, c. Adaptive, d. Tele-operated [2].

3. According to the application area:
a. Personal or Domestic, b. Professional services (industrial), c. Research (I+D in robotics) [3].

4. According to the chronological development of the robots, it's a classification by generations: a. First generation: they perform a repetition of the tasks for which they were scheduled in a sequential manner, b. Second generation: these are fitted with sensors that allow them to obtain information from its environment and act according to the current conditions of it, c. Third generation: these have a schedule and have the

ability to schedule their tasks according to the conditions of the work [1].

Mobile Robot (MR)

ISO 8373 defines a mobile robot as: "A robot that contains everything necessary for its piloting and movement (power, control and navigation system)" [2]. In general, an MR is composed of the following systems: a. Mechanical, b. Measurement and perception, c. Control, and d. Power supply. In Figure 1, the block diagram of a MR is presented [4].

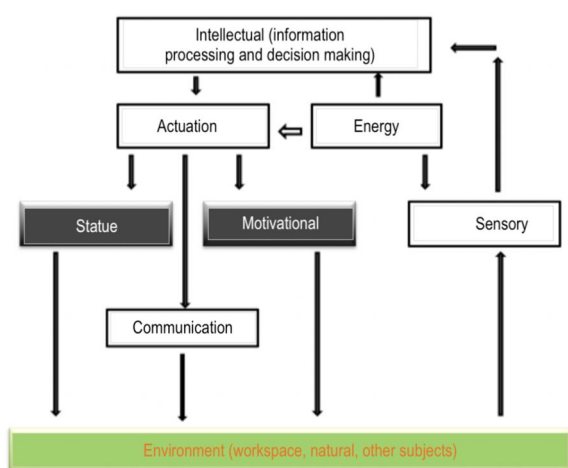


Fig.1. Block diagram of a MR

The mechanical system allows the MR to move according to the task for which it was designed. It is important to remember, that the purpose of an MR is not simply to move, for this automaton to be useful it must comply with a defined displacement that allows it to perform an assigned task.

According to the displacement mechanism, an MR can be classified into: a. Wheels, b. Legs and c. Tracks. Across various research works that have been carried out over time, it has been determined that

the mechanism that offers the best performance are wheels, because they offer the following advantages: it has a better energy efficiency on smooth surfaces, causes less impact on travel surfaces, requires simpler systems with fewer components [5].

According to the kinematics required by the MR, three fundamental complications arise in terms of its design and operation: a. Location system, b. Navigation system and, c. The construction and recognition of maps of the work environment [6].

The localization function requires the MR to have a continuous knowledge of its position with respect to a frame of reference, this is a fundamental factor for the development of autonomous robots. In this way, devices can be distinguished according to their level of autonomy in the following categories: a. Guided devices, in which, the operation of the device is limited to predefined routes and, b. Unguided (autonomous) devices, which are not restricted to predefined routes [7].

Methods of localization

There is no single method of localization for MR, these can be focused on two groups: a. Relative position measurements and b. Absolute position. The relative position methods in turn are classified into: 1. Odometry and 2. Inertial navigation.

The absolute position measurement methods are classified into: 1. Magnetic positioners (compasses), 2. Active beacons, 3. Global positioning systems, 4. Navigation on reference points and correspondence models [8].

Odometry is one of the most reliable localization techniques for MR, it consists of integrating the information obtained through sensors of the displacement of the MR over time. It has as advantages: high levels of accuracy in small time intervals, high sampling rates and low cost. But also, by accumulating a large amount of information over time, it has the disadvantage that a large number of errors accumulate over time [9]. These errors are of two types: systematic and no systematic, they depend on imperfections in the elements of the robot, as well as external causes such as sliding by the type of surface or any interaction of the robot with the contact surface. The measurement of errors in odometry is a critical process that can be very complex, Borenstein and Feng [10] developed a method of quantitative measurement of systematic errors for this localization technique that is widely used.

Navigation System

This is responsible for determining the most appropriate route to achieve the proposed objective, as well as avoiding the obstacles that may arise when traveling this route. This is a complex problem in the design of a mobile robot, since it can be found in environments with fixed objects or also areas where the dynamics are more complex since rapid changes in objects that represent obstacles for the automaton can occur.

For the implementation of the navigation control system it is advisable to divide

the problem, so that it fulfills the following operations: 1. Establish the current position of both the automaton and the objects that are within the environment where the robot will be mobilized, 2. Avoid collisions with objects that are in front of the robot, 3. Determining the route that will be able to reach the target set for the robot and, 4. Resolve any conflicts that may arise for the fulfillment of the aforementioned tasks taking into account how the automaton kinematics are implemented.

Most of the methods developed for the solution of this problem, use techniques based on the use of computational intelligence and sophisticated control methods, which allow the robot to react quickly by adapting to the environment on which it must mobilize on.

According to the criteria of the navigation system of the mobile robot, these devices can be placed in two categories [11]:

a. Holonomic robot: these automata are able to modify their travel direction very quickly and without having to rotate beforehand. Therefore, they possess complete freedom of movement, because they are able to move in any direction at any time regardless of their orientation. That is why they are said to have the same degrees of freedom as of control.

b. Non-holonomic robot: these do not have the same movement capacity as the previous case and cannot be moved in all directions. This is why it is said that this type of robots have more degrees of freedom than control.

Navigation Methods

There are a wide variety of techniques that have been researched and developed for MR navigation, among the most important are [12]: a. Localization and cartography, b. Local and global navigation techniques, c. Arbitration by navigation commands and, d. Integrated approaches.

The Kalman filter (KF) is one of the most widely used methods for tracking and estimation due to its simplicity, optimality, tractability and robustness. Different implementations of the Kalman filter are presented in works [13-17]. This method is widely used in navigation systems of aircrafts, ships, submarines, spacecrafts, missiles, ground vehicles, etc. For a long time, this recurrent filter had a limited application due to the high requirements imposed on the onboard equipment of the robot in terms of computing capability and a large amount of memory required from the microcontrollers and other devices.

Obstacle avoidance algorithms

These work in the same way as any other algorithm would, counting on a general structure which will be repeated over and over again until the final goal is reached. They have the following elements:

Inputs: they use sensors (local planning), maps (global planning) and the final goal to be achieved by the mobile robot.

Process: it is composed of all the necessary operations and calculations by which it transmits the input information to reach the desired output. In the case of an obstacle avoidance algorithm, the process

takes all the information from the sensors or from a preloaded map, and performs the route planning to reach the target.

Outputs: it is shaped by the desired angular direction in which the MR should move.

In this research work the following algorithms were analyzed [18]:

RRT (Rapid Random Tree): Uses randomness to define a feasible path between a starting point of the map to an end point in it. This randomness leads to the union of nodes along the map, chained one after the other, so that the structure that the algorithm forms resembles that of a tree and its branches.

RRT* (Rapid Random Tree Star): it is a modification of the RRT algorithm, among its variants there are: the addition of a "neighborhood area or search area" that is formed to each node when it is generated. The second change is a record of the cost of each generated node, this cost refers to the distance traveled from the initial node to the new generated node. The last change allows the possibility of connecting an already existing node to the new generated node in a way that reduces the cost of the existing node.

PFPP (Potential Field Path Planning): in this a potential field of attraction is established around the objective to be reached, simultaneously a repulsive potential field is established around the obstacles to be avoided. In this way, attractive and repulsive forces are used to guide a mobile robot towards a specific target.

VFF (Virtual Force Field): Uses repulsive forces exerted by obstacles along with an individual attractive force exerted by the final target to guide the MR towards its goal, while dodging any obstacles that might arise on the way. This is a local planning algorithm, since it does not have any prior information about the map where the mobile robot will move and is only based on the information obtained by distance sensors placed around it, which verifies the obstacles in the vicinity of the robot.

VFH (Vector Field Histogram): it is a local planning algorithm, this can be considered as an evolution of the VFF algorithm. In the VFH, a larger number of sensors are used in order to cover all the surroundings of the MR and, due to the large number of sensors, the data received by these must go through a reduction and conditioning process before they can be used to calculate the direction in which the MR should move. This algorithm reduces the information of the robot's environment in a procedure divided into two steps. The first is the transformation of the Cartesian map where it shifts the MR into a 1D polar histogram (one dimension). The second step is the discretization of this histogram to proceed to divide the robot environment into sectors that can be considered as “busy” or free”. After the determination of the state of all sectors, an evaluation is carried out to select the optimal direction, within one of the free sectors, in which the MR will be directed.

Methodology and tools

1. Modeling of the differential mobile robot.
2. Design of Models and Maps with obstacles.
3. Coding of Algorithms.
4. Simulations using MatLab and Simulink.

Modeling of the differential mobile robot

For this task, certain parameters of the robot were taken into account such as the angular and linear speed of the wheels, the radius of the same and the distance between the wheels of the robot. These parameters can be seen in Figures 2-3.

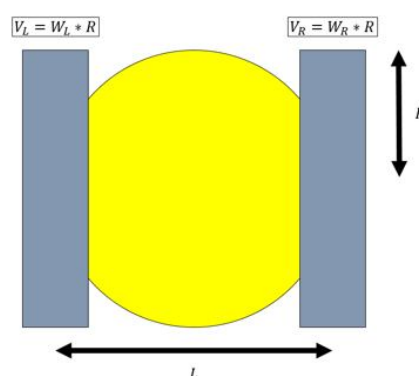


Fig. 2. MR parameters

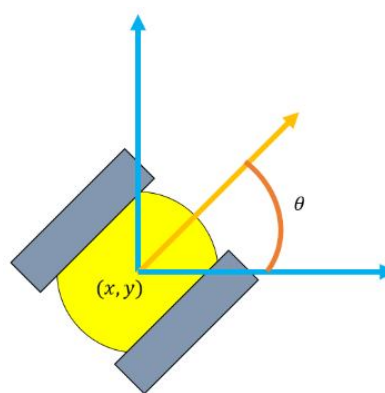


Fig. 3. Angular movement

The linear speed of the MR produced by the individual speeds of each wheel can be calculated by the following equation:

$$V = \frac{R \times W_R + R \times W_L}{2}, \quad (1)$$

and the angular velocity W of the robot can be calculated by the following equation:

$$\dot{\theta} = W = \frac{R}{L} \times (W_R - W_L), \quad (2)$$

where: V linear speed of the robot (m/s),

W – angular velocity of the robot (rad/s),

W_R – angular velocity of the robot right wheel (rad/s),

W_L – angular velocity of the robot left wheel (rad/s),

R – radius of the robot wheels (m),

L – robot diameter (distance from wheel to wheel) (m).

Simplifying, an angular velocity W_L of the left wheel and an angular velocity W_R of the right wheel are expressed as the position variation of the robot on the X axis and Y axis, and the angular velocity as

the variation of the angular position [19-21], thereof

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{R}{2} \times (W_R + W_L) \times \cos \theta \\ \dot{y} = \frac{R}{2} \times (W_R + W_L) \times \sin \theta \\ \dot{\theta} = \frac{R}{L} \times (W_R - W_L) \end{cases} \quad (3)$$

Test map modeling

This is done using the Matlab *occupancyMap* command, which is used to create a mesh of spaces of a certain width, height and resolution. Figure 4 shows a map of 20 spaces high x 20 spaces wide with a resolution of (1/10) meters per space, which generates a map of 2x2 meters. In order to define which spaces are empty and which are occupied, the *updateOccupancy* command is used. You can also see the map presented in the figure with the spaces (0.1, 0.1) and (2, 0.1) declared as occupied and empty spaces respectively.

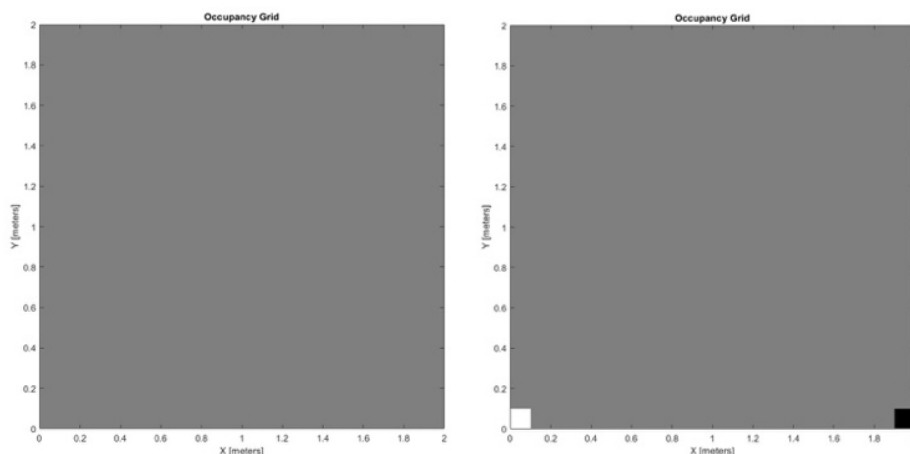


Fig. 4. A 2x2 meter map generated with *occupancyMap* and Map with updated occupancy values

For the simulation, two different maps are prepared. The first of these is the one that can be seen in Figure 5, which is a

simple closed map of 2x2 meters with a square obstacle of 40 cm on each side that will be used to check the correct operation

of the algorithms. In the figure on the right, you can see the second map, which is a closed map of 5x5 meters with several obstacles inside it that will be used to ana-

lyze the behavior of the algorithms after checking that they work correctly on the first map.

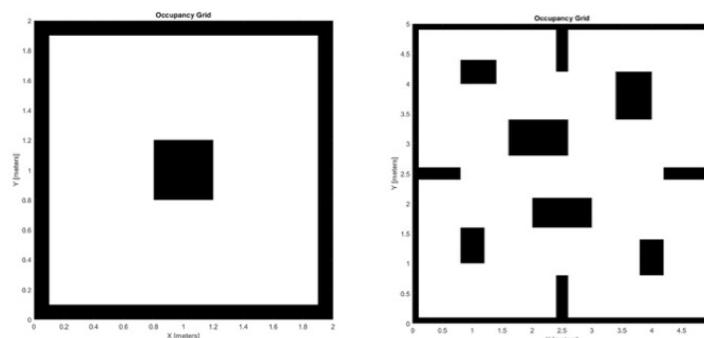


Fig. 5. Maps with obstacles for the verification of the algorithms

Results obtained

In Figure 6, the simulation of the route for each of the analyzed algorithms is presented.

For the analysis and comparison of the different simulated algorithms, an evaluation of the time and distance traveled was carried out to comply with 10 test routes with obstacles – Figures 7-8.

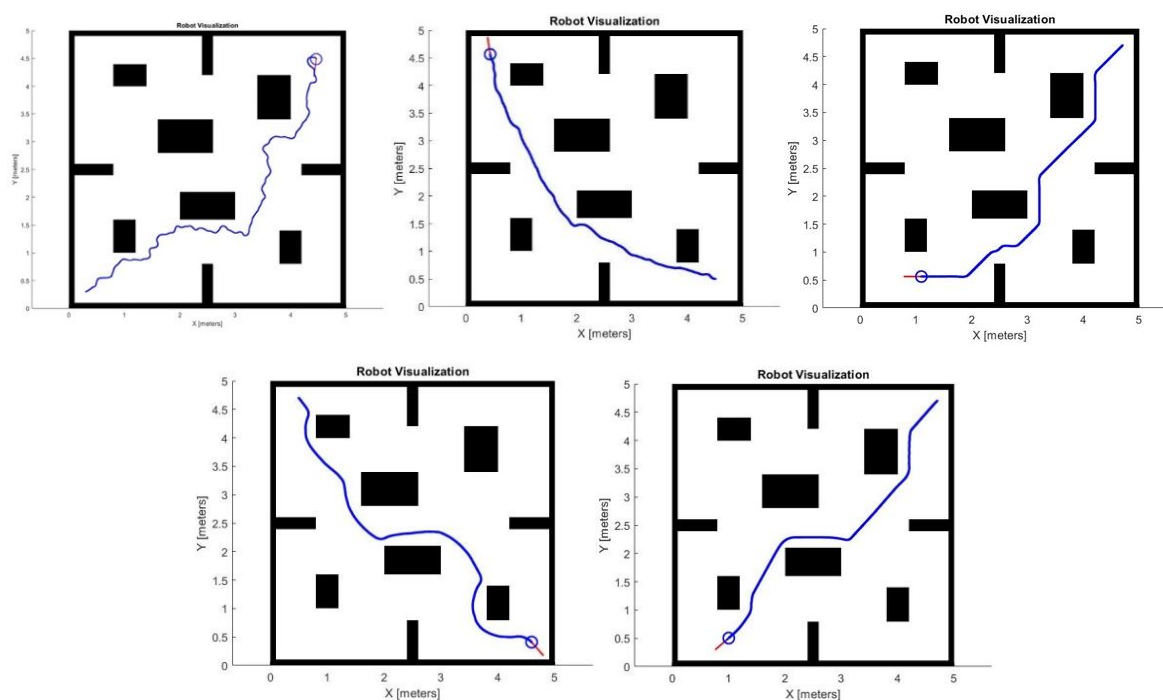


Fig. 6. Route simulation for RRT, RRT*, PFPP, VFF and VFH algorithms (from left to right)

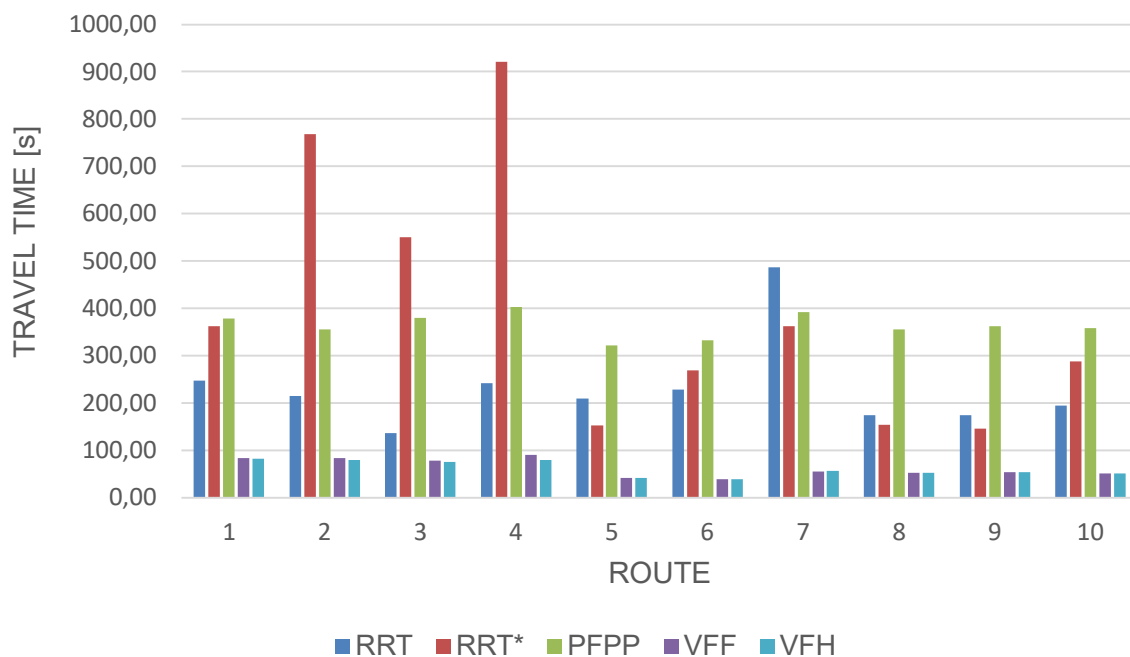


Fig. 7. Times for fulfillment of 10 routes of each algorithm

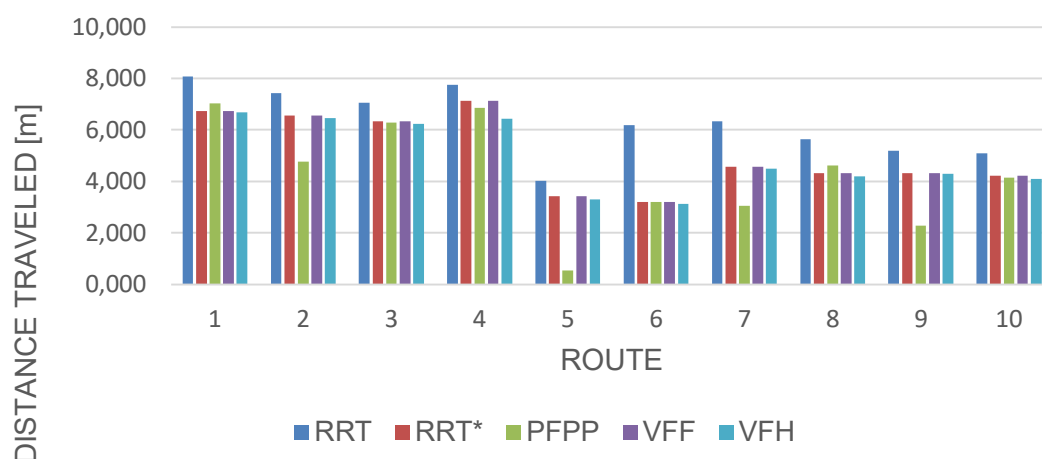


Fig. 8. Distances for compliance of 10 routes of each algorithm

Conclusions

Algorithms can be classified into two classes: global planification (RRT, RRT* and PFPP) and local planification (VFF and VFH). The global type (GP), are characterized by planning the route to be followed by the mobile robot prior to its movement, while the local type (LP) plans

in real time the route to be followed by the MR, a route which is calculated and recalculated iteratively based on the information from the environment outside the robot that is collected by the sensors.

The GP algorithms reach the objective in a much longer time than the LP algorithms due to their analysis of the map,

which, sometimes, can become excessive and inefficient.

LP algorithms have a great advantage, which is to plan the desired route to be followed by the MR in real time based on information from the surroundings of the MR, information that is measured by distance sensors. This quality gives a great potential to this type of algorithms, since they can be used for guide exploration MR, which could be used to map unknown and/or dangerous places.

LP algorithms travel a more efficient distance than GP algorithms. Another advantage to highlight is the time that these algorithms need to get from point A to point B, which is much reduced compared to GP algorithms, due to the fact that they do not need a previous route planning time.

The VFH algorithm, despite its complexity, it is the most effective and controlled algorithm. This generates optimal, short and stable routes, which guide the MR towards its goal in a relatively short time. However, the reaction of this algorithm to nearby frontal obstacles is slightly aggressive and could cause collisions in the case of having two obstacles very close to each other.

According to the results obtained, it can be concluded that LP algorithms have a superior performance to GP algorithms, so they are the most efficient for real applications. Although a correct combination of a GP algorithm with a LP could result in an optimal navigation system, which can overcome any type of obstacle and guide an MR efficiently through any type of environment no matter how complicated it is.

References

1. Barrientos A. *Fundamentos de Robotica*. McGraw-Hill. Second edition. 2007. 613 p.
2. UNE EN ISO 8373:1998. Robots manipuladores industriales. Vocabulario, 1998.
3. IFR. Clasificación de los robots de servicio por Áreas de aplicación según IFR / IFR. Available at: https://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/aa1_ifr_robots.pdf (Access date: 28.04.2020).
4. Chen X.Q., Chen Y.Q., Chase J.G. Chapter: Mobile Robots – Past Present and Future. State of the Art in Land, Sea, Air, and Collaborative Missions. Libro. InterchOpen. 2009, 337 p.
5. Barrientos Sotelo V., García Sánchez J. R., Silva Ortigoza R. Robots Móviles: Evolución y Estado del Arte. *Revista Polibits*, 2007, vol. 35, no. 1, pp. 12-17.
6. Sorour M., Cherubini A., Khelloufi A., Passama R., Fraisse P. Complementary-route based ICR control for steerable wheeled mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 2019, no. 118, pp. 131–143.
7. Aguilera M. Diseño y Control de Robots Móviles. Instituto Tecnológico Nuevo Laredo, Aguilera M. Bautista M., Iruegas J. Available at: <http://www.mecamex.net/anterior/cong02/papers/art24.pdf> (Access date: 31.10.2022).

8. Borenstein J., Everett H. R., Feng L., Wehe D. Mobile Robot Positioning: Sensors and Techniques. *Journal of Robotic Systems*, 1997, no. 14, vol. 4, pp. 231–249.
9. Nakhaeinia D., Tang S. H., Mohd Noor S. B., Motlagh O. A review of control architectures for autonomous navigation of mobile robots. *International Journal of the Physical Sciences*, 2011, vol. 6(2), pp. 169-174.
10. Borenstein J., Feng L. Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996, vol. 6, no. 12, pp. 869–880.
11. Batlle J., Barjau A. Holonomy in mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 2009, vol. 57, pp. 433-440.
12. Ibrahim M. Y., Fernandes A. Study on mobile robot navigation techniques. *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2004, vol. 1, pp. 230-236.
13. Zhou B., Peng Y., Han J. UKF Based Estimation and Tracking Control of Nonholonomic Mobile Robots with Slipping. *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2008, pp. 2058-2063.
14. Bezmen P.A. *Digital filter for non-stationary signals*. Patent RF, no. 2747199, 2021 (In Russ.).
15. Bezmen P.A. *Control system based on the state of the control object with an observer and a state controller*. Patent RF, no. 2775514, 2022 (In Russ.).
16. Bezmen P. A. Investigation of the Operation of the Extended Kalman Filter Supplemented by an Adaptive Digital Filter for Integrating Data from a Mobile Robot Control System // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(6): 68-89 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-68-89>
17. Bezmen P.A. [Kompleksirovaniye dannyykh sistemi upravleniya mobil'nym gusenichnym robotom]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2022, no. 3, pp. 89–102. (In Russ.). DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-89-102.
18. Leca D., Cadenat V., Sentenac T. Sensor-based algorithm for collision-free avoidance of mobile robots in complex dynamic environments. *European Conference on Mobile Robot (ECMR)*. Prague. Czech Republic, 2019, pp.1-6.
19. Juliano G. Iossaqui, Juan F. Camino, Douglas E. Zampieri A Nonlinear Control Design for Tracked Robots with Longitudinal Slip. *IFAC Proceedings Volumes*, 2011, vol. 44, is. 1, pp. 5932-5937.
20. Moosavian S. A. A., Kalantari A. Experimental slip estimation for exact kinematics modeling and control of a Tracked Mobile Robo. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008, pp. 95-100.

21. Martínez J.L., Mandow A., Morales J., Pedraza S., García-Cerezo A. Approximating Kinematics for Tracked Mobile Robots. *The International Journal of Robotics Research*, 2005, vol. 24, is. 10, pp. 867-878.

Information about the Authors / Информация об авторах

Nelson Ramiro Gutierrez Suquillo,
Associate Professor,
Universidad UTE, Quito, Ecuador,
e-mail: nelson.gutierrez@ute.edu.ec

Raul Paredes, Associate Professor,
Universidad UTE, Quito, Ecuador,
e-mail: raulv.paredes@ute.edu.ec

Petr A. Bezmen, Cand. of Sci.(Engineering),
Associate Professor, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: pbezmen@yahoo.com

Нельсон Рамиро Гутьеррес Сукильо,
доцент, Университет UTE,
г. Кито, Эквадор,
e-mail: nelson.gutierrez@ute.edu.ec

Рауль Паредес, доцент,
Университет UTE, г. Кито, Эквадор,
e-mail: raulv.paredes@ute.edu.ec

Безмен Петр Анатольевич, кандидат
технических наук, доцент, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: pbezmen@yahoo.com

Напряженно-деформированное состояние пологой оболочки на упругом основании с переменными прочностными характеристиками

А. Г. Колесников¹ ✉, А. А. Иванов¹

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

✉ e-mail: ag_kolesnikov@mail.ru

Резюме

Целью исследования является исследование изменения напряженно-деформированного состояния конструкций пологих оболочек на упругом основании при изменении его прочностных характеристик.

Методы. Методом Бубнова-Галеркина решается система дифференциальных уравнений состояния пологих оболочек на упругом основании с учетом геометрической нелинейности работы материала конструкции. Аппроксимирующая функция позволяет моделировать различные условия опирания конструкции на основание.

Результаты. В аналитическом виде получены выражения для определения напряжений и критической нагрузки в изотропных пологих оболочках, покоящихся на упругом основании с учетом геометрической нелинейности работы конструкции. Прочностные характеристики основания заданы функцией, что позволяет моделировать различные грунты и их распределение под подошвой конструкции. Приведены графики возможного распределения коэффициента, характеризующего быстроту затухания осадок в глубине основания под подошвой фундамента. Показано несколько вариантов резкого уменьшения прочностных характеристик основания под частью конструкции. Приведены зависимости критической нагрузки для пологой оболочки от изменения форм и величин участков упругого основания с пониженными прочностными характеристиками. Показаны сравнительные графики напряжений и критической нагрузки для конструкций фундаментов зданий и сооружений в виде плит и пологих оболочек на упругом основании.

Заключение. Приведенные аналитические уравнения для определения напряжений и критической нагрузки позволяют проектировать и исследовать фундаменты зданий и сооружений в виде плит и пологих оболочек на упругом основании. Показанные зависимости помогают подобрать рациональные геометрические характеристики конструкций, позволяющие сохранить несущую способность при изменении прочностных характеристик основания под частью конструкции.

Ключевые слова: упругое основание; фундамент; пологая оболочка; критическая нагрузка; пространственные конструкции.

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

Для цитирования: Колесников А. Г., Иванов А. А. Напряженно-деформированное состояние пологой оболочки на упругом основании с переменными прочностными характеристиками // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(3): 21-33. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-21-33>.

Поступила в редакцию 23.07.2023

Подписана в печать 05.09.2023

Опубликована 28.10.2023

Stress-Strain State of Shallow Shell in an Elastic Foundation with Variable Strength Characteristics

Alexander G. Kolesnikov ¹ ✉, Andrey A. Ivanov ¹

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

✉ e-mail: ag_kolesnikov@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Changes in the stress-strain state of structures of shallow shells on an elastic foundation with a change in its strength characteristics investigation.

Methods. To solve a system of differential equations of state for shallow shells in an elastic state the Bubnov-Galerkin method is used. Geometric non-linearity of work material of construction is taken into account. The approximating function allows you to simulate various conditions for supporting a structure on a foundation.

Results. Expressions are obtained for determining the stresses and critical load in isotropic shallow shells resting on an elastic foundation in analytical form. The geometric nonlinearity of the structure taking into account. The strength characteristics of the base are given by a function, which allows modeling various soils and their distribution under the base of the structure. Graphs of the possible distribution of the coefficient characterizing the rate of sediment attenuation in the depth of the foundation under the base of the foundation are given. Several variants of a sharp decrease in the strength characteristics of the base under a part of the structure are shown. Dependences of the critical load for a shallow shell on the shapes and sizes of sections of the elastic foundation with reduced strength characteristics are given. Comparative graphs of stresses and critical load are shown for the foundation structures of buildings and structures in the form of slabs and shallow shells on an elastic foundation.

Conclusion. Analytical equations for stresses and critical loads determining make it possible to design and investigation the foundations of buildings and structures in the form of slabs and shallow shells on an elastic foundation. The dependencies lets to select rational geometric characteristics of structures, allowing maintaining the bearing capacity when changing the strength characteristics of the base under a part of the structure.

Keywords: shallow shell; elastic foundation; building foundation; critical load; spatial structures.

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

For citation: Kolesnikov A. G., Ivanov A. A. Stress-Strain State of Shallow Shell in an Elastic Foundation with Variable Strength Characteristics. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University. 2023; 27(3): 21-33 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-21-33>.

Received 23.07.2023

Accepted 05.09.2023

Published 28.10.2023

Введение

Фундаменты в виде сплошных монолитных плит применяются при относительно слабых, водонасыщенных грунтах и значительных нагрузках на основание. При этом может произойти

частичное ухудшение несущей способности грунта основания под зданием или сооружением, что влечет за собой разрушение вышестоящих конструкций даже при использовании сплошного фундамента (рис.1).



Рис. 1. Примеры последствий изменения несущей способности грунта под частью здания и сооружения

Fig. 1. Examples of the consequences of subsidence of soil under a part of a building and structure

Эти негативные процессы могут быть учтены на стадии проектирования путем внесения дополнительных коэффициентов или расчета на запроектные воздействия. Однако это неизменно приведет к увеличению стоимости конструкции и увеличению её веса.

Альтернативным путем является рационализация напряженно-деформированного состояния конструкции за счет изменения формы – придание небольшой стрелы подъема, т.е. использования в качестве фундаментов зданий и сооружений пологих оболочек на упругом основании.

В настоящее время исследование фундаментов в виде плит и пологих оболочек на упругом основании представлено большим количеством авторов, работающих в разных странах. Наиболее интересны в рамках проводимого исследования работы, посвященные изменению прочности и устойчивости конструкций [1-5] при варьировании различных параметров. Известны работы по изучению колебаний плитных конструкций на упругом основании [6-9], в том числе при учете геометрической нелинейности работы тонкой конструкции [10,11]. Проводятся иссле-

дования конструкций из ортотропных материалов [12-14] и многослойных составных конструкций [15], что позволяет моделировать работу железобетонных фундаментов с различным армированием.

При проведении современных расчетов и исследований в большинстве случаев используются программные комплексы, реализующие численные методы [16,17]. Однако в решении некоторых задач проектирования, а особенно синтеза и оптимизации конструкций более точные результаты можно получить с использованием численных методов прямого вариационного исчисления [18].

При использовании существующих методик исследования напряженно-деформированного состояния пологих оболочек на упругом основании возникают сложности с учетом изменения прочностных характеристик грунта под частью основания. Следовательно, есть необходимость в развитии таких методик.

Материалы и методы

Для расчета фундамента в виде плиты или пологой оболочки на прямоугольном плане, находящейся на упругом основании (рис.1) с произвольным видом опирания и соотношением сторон, загруженного вертикальной равномерно распределенной нагрузкой, воспользуемся системой уравнений (1). Величины прогибов соизмеримы с толщиной конструкции, которая мала по сравнению с размерами в плане. Запи-

шем уравнение (1) так, чтобы оно учитывало геометрическую нелинейность работы конструкции [19, 20]:

$$\begin{cases} \frac{1}{Eh} \nabla^2 \nabla^2 \varphi + k_y \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + k_x \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2k_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \\ + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 = 0; \\ D \nabla^2 \nabla^2 w - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \left(k_x + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \left(k_y + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \\ + 2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \left(k_{xy} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) = Z + 2t \nabla^2 w - kw, \end{cases} \quad (1)$$

где φ , w , Z – соответственно функции напряжений, прогибов и нагрузки; k – параметр, характеризующий работу упругого основания на сжатие; t – параметр, характеризующий работу упругого основания на сдвиг.

Параметры работы упругого основания запишем в виде:

$$k = \frac{E_{\text{осн}}}{1 - \nu_{\text{осн}}} \int_0^H \Psi'^2 dz, \quad (2)$$

$$t = \frac{E_{\text{осн}}}{4(1 - \nu_{\text{осн}})} \int_0^H \Psi^2 dz. \quad (3)$$

Входящие в выражения для определения характеристик работы упругого основания на сдвиг и на сжатие неизвестные могут быть определены из соотношений:

$$E_{\text{осн}} = \frac{E_s}{1 - \nu_s}, \quad (4)$$

$$\nu_{\text{осн}} = \frac{\nu_s}{1 - \nu_s}, \quad (5)$$

где E_s и ν_s – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона основания (рис. 2); $\Psi(z)$ – функция поперечного распределения перемещений; H – толщина основания, участвующего в работе.

Модуль упругости основания из некоторого количества слоев грунта с различными деформативными и проч-

ностными характеристиками может быть получен последовательным приведением двуслойной системы к однослойной.

Функция поперечного распределения перемещений задана в виде:

$$\Psi(z) = \frac{\operatorname{sh} \gamma \frac{H-z}{a}}{\operatorname{sh} \gamma \frac{H}{a}}, \quad (6)$$

где γ – коэффициент, характеризующий быстроту затухания осадок в глубине основания.

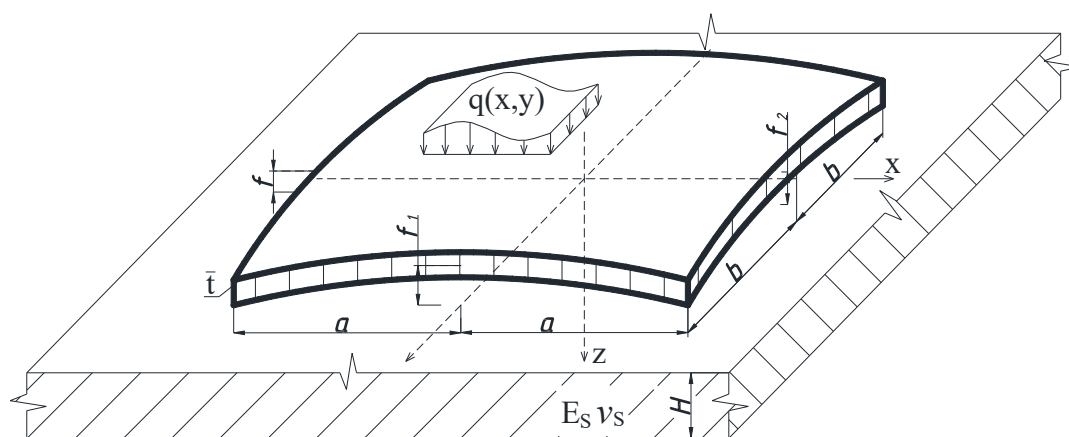


Рис. 2. Расчетная модель фундамента в виде пологой оболочки

Fig. 2. Foundation model in the form of a shallow shell

Коэффициент γ может быть представлен в виде функции, задающей различную скорость затухания осадок под подошвой фундамента. Например, может быть использована функция вида:

$$\gamma(x, y) = \gamma_{\min} \left(1 + s \left(\frac{(x+m)}{a} \right)^{2\eta} \right) \left(1 + l \left(\frac{(y+n)}{b} \right)^{2\theta} \right), \quad (7)$$

где $\gamma_{\min}$ – минимальное значение коэффициента, характеризующего быстроту затухания осадок в глубине основания под подошвой фундамента; s, m, l, n, η, θ – коэффициенты, характеризующие форму изменения коэффициента, характеризующего быстроту затухания осадок в глубине основания под подошвой фундамента.

Варьирование коэффициентов s, m, l, n, η, θ позволяет задавать большое ко-

личество вариантов распределения отпора (формы и значений) под подошвой фундамента.

Рассмотрим случай, когда свойства грунта меняются под частью конструкции. В том числе, когда его значение стремится к нулю. Используя выражение (7), смоделируем несколько вариантов (рис. 3).

Напряжения в любой точке оболочки можно определить по четвертой гипотезе прочности при помощи метода Бубнова-Галеркина с применением базисных функций В.З. Власова [21]:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2)^2 + (\bar{\sigma}_3 - \bar{\sigma}_2)^2 + (\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_1)^2]}, \quad (8)$$

где напряжения вдоль оси x (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_1 = & \left| \frac{6}{\bar{t}} \bar{D} \bar{B} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} Z_x Z_y + \nu \frac{\partial^2}{\partial y^2} Z_y Z_x \right) \right| + \\ & + \left| \bar{A} \frac{\partial^2}{\partial y^2} Z_y Z_x \bar{t} \right| + \\ & + \left| \frac{g}{\bar{t}^2} \bar{D} \bar{B} \left(\frac{\partial^3}{\partial x^3} Z_x Z_y + \frac{\partial}{\partial x} Z_x \frac{\partial^2}{\partial y^2} Z_y \right) \right|, \end{aligned} \quad (9)$$

– напряжения вдоль оси у (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_2 = & \left| \frac{6}{\bar{t}} \bar{D} \bar{B} \left(\nu \frac{\partial^2}{\partial x^2} Z_x Z_y + \frac{\partial^2}{\partial y^2} Z_y Z_x \right) \right| + \\ & + \left| \bar{A} \frac{\partial^2}{\partial x^2} Z_x Z_y \bar{t} \right| + \\ & + \left| \frac{g}{\bar{t}^2} \bar{D} \bar{B} \left(\frac{\partial^3}{\partial y^3} Z_y Z_x + \frac{\partial}{\partial y} Z_y \frac{\partial^2}{\partial x^2} Z_x \right) \right|. \end{aligned} \quad (10)$$

– напряжения вдоль оси z (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_3 = & \left| \frac{6}{\bar{t}} (1-\nu) \bar{D} \bar{B} \frac{\partial}{\partial x} Z_x \frac{\partial}{\partial y} Z_y \right| + \\ & + \left| \bar{A} \frac{\partial}{\partial x} Z_x \frac{\partial}{\partial y} Z_y \bar{t} \right|. \end{aligned} \quad (11)$$

Безразмерный коэффициент цилиндрической жесткости:

$$\bar{D} = \frac{D}{Eh^3}, \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}. \quad (12)$$

Неизвестные метода Бубнова-Галеркина, входящие в выражения для определения напряжений:

$$\bar{A} = \frac{A \cdot a^2}{Ef^5}, \quad \bar{B} = \frac{B \cdot a^2}{f^2}, \quad (13)$$

$$A = -\frac{1}{J_1} (BJ_2 + B^2 J_3), \quad (14)$$

$$\begin{aligned} B = & \frac{1}{6C_1} (36C_3 C_2 C_1 + 108qC_1^2 - 8C_2^3 + \\ & + 12\sqrt{3}(4C_3^3 C_1 - C_3^2 C_2^2 + 18C_3 C_2 C_1 q + \\ & + 27q^2 C_1^2 - 4qC_2^3)^{1/2} C_1)^{1/3} - \\ & - \frac{2}{3} (3C_3 C_1 - C_2^2) / (C_1 (36C_3 C_2 C_1 + 108qC_1^2 - \\ & - 8C_2^3 + 12\sqrt{3}(4C_3^3 C_1 - C_3^2 C_2^2 + 18C_3 C_2 C_1 q + \\ & + 27q^2 C_1^2 - 4qC_2^3)^{1/2} C_1)^{1/3} - \frac{1}{3} \frac{C_2}{C_3}). \end{aligned} \quad (15)$$

Безразмерная стрела подъема и толщина конструкции заданы соответственно выражениями:

$$g = \frac{f}{a}, \quad \bar{t} = \frac{h}{f}. \quad (16)$$

Коэффициенты, входящие в уравнения для определения неизвестных метода Бубнова-Галеркина:

$$\begin{aligned} C_1 = & 2Eh \frac{J_3^2}{J_1 J_4}, \quad C_2 = 3E \frac{J_3 J_2}{J_1 J_4}, \\ C_3 = & D \frac{J_1^2}{J_1 J_4} + Eh \frac{J_2^2}{J_1 J_5}. \end{aligned} \quad (17)$$

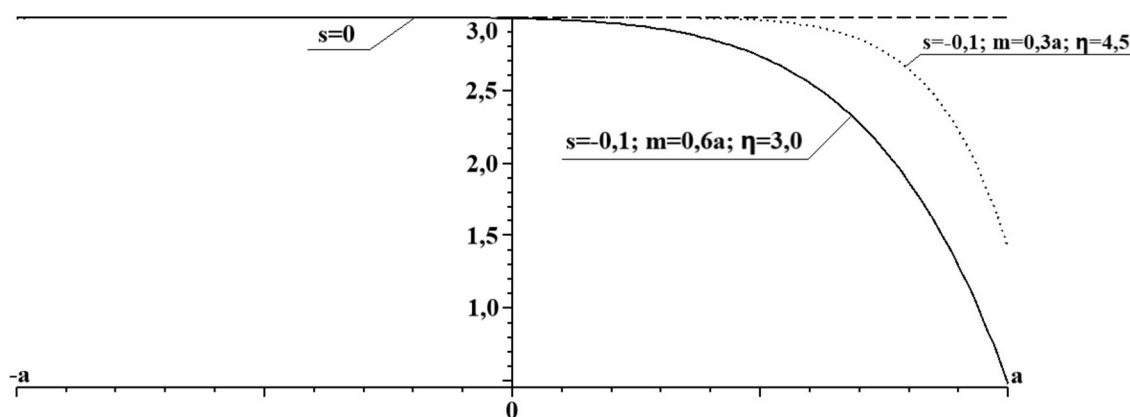


Рис. 3. Форма распределения коэффициента, характеризующего быстроту затухания осадок в глубине основания под подошвой части фундамента

Fig. 3. Distribution of values of the attenuation coefficient of settlement under the sole of the foundation part

$$J_1 = \int_{-a}^a \int_{-b}^b (\nabla^2 \bar{w}) \bar{w} dx dy, \quad (18)$$

$$J_2 = \int_{-a}^a \int_{-b}^b \left(\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x \partial y} \right) \bar{w} dx dy, \quad (19)$$

$$J_3 = \int_{-a}^a \int_{-b}^b (\Delta \bar{w}) \bar{w} dx dy, \quad (20)$$

$$J_4 = \int_{-a}^a \int_{-b}^b Z \bar{w} dx dy, \quad (21)$$

$$J_5 = \int_{-a}^a \int_{-b}^b (2t \nabla^2 \bar{w} - k \bar{w}) \bar{w} dx dy. \quad (22)$$

В соотношениях (1-16) приняты следующие обозначения:

h – постоянная вдоль образующей толщина конструкции фундамента;

E – модуль упругости материала конструкции фундамента;

ν – коэффициент Пуассона материала конструкции;

$F=F(x,y)$ – функция срединной поверхности, которую можно представить в виде поверхности переноса [20];

A, B – неизвестные, используемые при применении метода Бубнова-Галеркина,

Z_x, Z_y – балочные функции В.З. Власова.

При проектировании зданий и сооружений зачастую встречаются фундаменты, толщина которых значительно меньше размеров в плане, поэтому возникает необходимость проверки конструкции на устойчивость. Для определения коэффициента критической нагрузки для рассматриваемой конструкции воспользуемся уравнением:

$$P_{cr} = \frac{2}{27} \frac{1}{C_1^2} \left[(C_1^2 C_3 C_1)^{3/2} + C_2 \left(C_2^2 \frac{9}{2} C_1 C_3 \right) \right], \quad (23)$$

где коэффициенты $C_1 - C_3$ определяются соотношениями (17).

Выражения для определения напряжений (8) и критической нагрузки (23) для конструкций фундаментов в виде пологих оболочек могут быть использованы как в проектировании, так и в исследовании влияния различных факторов на напряженно-деформированное состояние конструкций.

Результаты и их обсуждение

Предложенная система уравнений, описывающих изменение напряженно-деформированного состояния конструкций фундаментов при изменении несущей способности грунта позволяет проводить исследования, оптимизировать геометрические параметры конструкции исходя из конкретных условий работы.

Уравнения для определения напряжений (8) и критической нагрузки (23) содержат функцию срединной поверхности, изменение которой в значительной мере меняет распределение внутренних усилий [20] и позволяет подобрать поверхность, отвечающую заданным эксплуатационным характеристикам.

Для удобства проведения исследований, получения зависимостей, сравнения получаемых результатов с другими методиками и анализа вносимых изменений без привязки к конкретным размерам, уравнения для определения напряжений и критической нагрузки представлены в безразмерном виде.

Использование изменяющейся формы распределения коэффициента, характеризующего быстроту затухания осадок в глубине основания под подош-

вой фундамента (см. рис. 3), позволяет управлять величиной отпора грунта в целях снижения напряжений и величины критической нагрузки, а также прогнозировать изменение напряженно-деформированного состояния конструкции в зависимости от потери несущей способности грунта под частью конструкции.

Проведем исследование изменения значения величины критической нагруз-

ки, определяемой выражением (23) в зависимости от параметров, входящих в выражение для определения коэффициента затухания осадок в глубине основания (7).

На рис. 4 представлено изменение коэффициента критической нагрузки при варьировании параметра m , влияющего на распределение коэффициента, характеризующего быстроту затухания осадок в глубине.

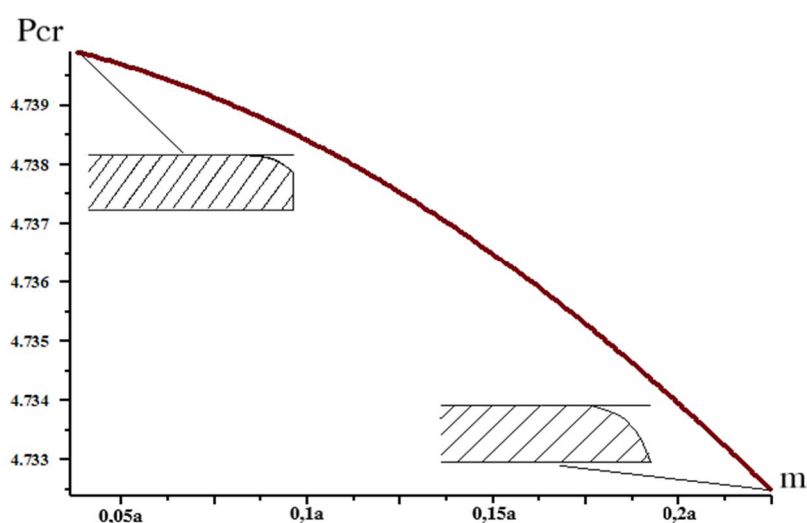


Рис. 4. График зависимости коэффициента критической нагрузки от параметра m

Fig. 4. Dependence of the critical load factor on the parameter m

На рис. 5 представлено изменение коэффициента критической нагрузки при варьировании параметра η (см. (7)), влияющего на распределение коэффициента, характеризующего быстроту затухания осадок в глубине. При этом моделируются нулевые прочностные характеристики основания под частью конструкции при $\eta = 2$.

Из графиков можно сделать вывод о том, что ухудшение свойств грунта даже под небольшой площадью фунда-

мента приводит к значительному снижению критической нагрузки.

На рис. 6 представлены кривые равных значений коэффициента критической нагрузки (24) и напряжений (9) для плиты и пологой оболочки на упругом основании при уменьшении свойств основания под $\sim 10\%$ площади. В качестве переменных используется относительная стрела подъема f/a и относительная толщина $\bar{t}=h/a$.

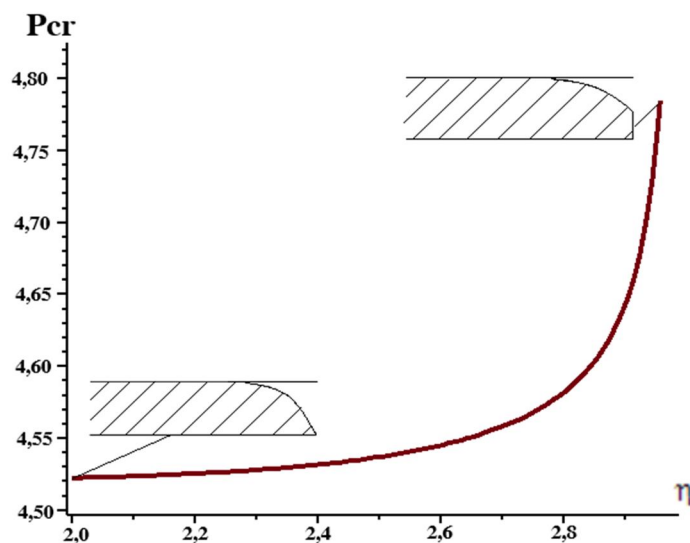


Рис. 5. График зависимости коэффициента критической нагрузки от параметра η

Fig. 5. Dependence of the critical load factor on the parameter η

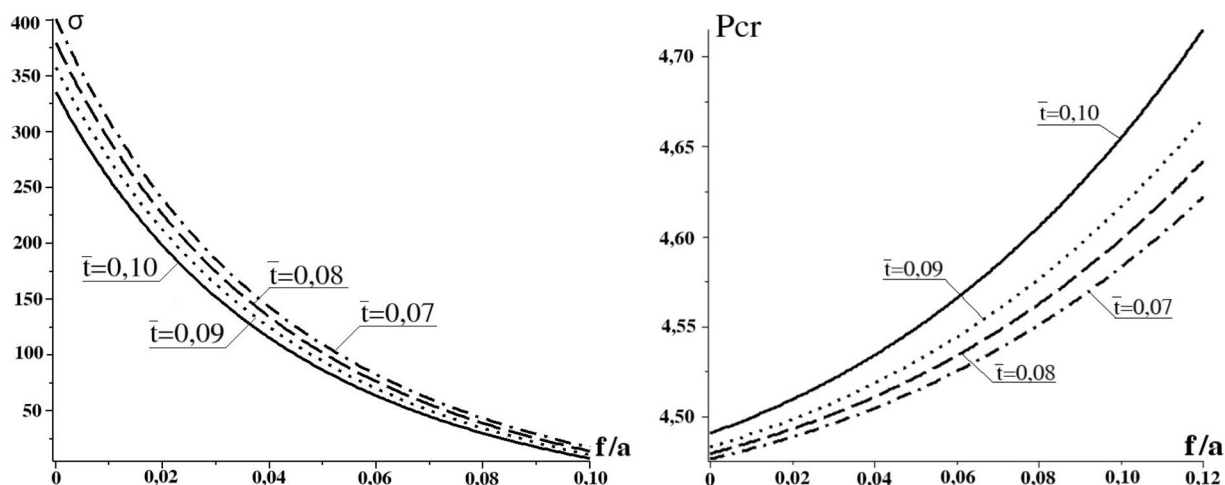


Рис. 6. Кривые равных: **а** – напряжений; **б** – критических нагрузок

Fig. 6. Curves of equal: **a** – stresses; **b** – critical loads

Из графиков видно, что при одинаковых значениях коэффициента критической нагрузки и напряжений может быть снижена толщина конструкции. Использование в качестве конструкций фундаментов пологих оболочек дает возможность сэкономить затрачиваемый материал и увеличить несущую способность при неожиданном изменении прочностных характеристик грунта под частью площади.

Выводы

Предложенная методика может быть использована для определения и исследования напряженно-деформированного состояния конструкций фундаментов в виде пологих оболочек на упругом основании при изменении прочностных характеристик части основания. Построенные графики зависимости критической нагрузки от различных параметров пока-

зывают значительное уменьшение несущей способности при уменьшении прочностных характеристик грунта под частью конструкции. Приведенные зависимости иллюстрируют преимущества ис-

пользования фундаментов в виде пологих оболочек над плитными в случае уменьшения несущей способности части грунта основания, вызванного различными воздействиями.

Список литературы

1. Maksymuk O. V., Sachuk Yu. V., Yatsyuk S. M. Plane Contact Problems for an Elastic Foundation with Two Bedding Coefficients // *Journal of Mathematical Sciences*. 2023. <https://doi.org/10.1007/s10958-023-06491-1>.
2. Straughan W. Analysis of plates on elastic foundations. Texas: Texas Tech University, 1980.
3. Wstawska I., Magnucki K., Kędzia P. Stability of three-layered beam on elastic foundation // *Thin-Walled Structures*. 2022; 175(6): 109208. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109208>.
4. Yangsheng YeShaowei, WeiDegou Cai. Calculation method for internal force and deformation of the prestressed I-beam on the elastic foundation // *Frontiers in Earth Science*. 2023; 10: 996876. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.996876>.
5. Tunay Uzbay Yelce Tunay, Uzbay Yelce Erdem, Balci Erdem, Balci Niyazi Özgür Bezin Niyazi, Özgür Bezin. A discussion on the beam on elastic foundation theory // *Challenge Journal of Structural Mechanics*. 2023; 9(1): 34-47. <https://doi.org/10.20528/cjsmec.2023.01.004>.
6. Sofiyev A. H., Turan F. 2021. On the nonlinear vibration of heterogenous orthotropic shallow shells in the framework of the shear deformation shell theory // *Thin-Walled Structures*. 2020 ; 161: 107181. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107181>.
7. Dao H, Nguyen D, Tran Q. Nonlinear vibration of imperfect eccentrically stiffened functionally graded double curved shallow shells resting on elastic foundation using the first order shear deformation theory // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2014; 80: 16 – 28. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.12.009>.
8. Nath Y., Jain. R. Non-linear dynamic analysis of shallow spherical shells on elastic foundations // *International Journal of Mechanical Sciences*. 1983; 25: 409-419.
9. Saurabh Kumar Subhankar, Das Debabrata Gayen Ankita Joshi. Dynamic analysis on axially functionally graded plates resting on elastic foundation // *Materials Today: Proceedings*. 2022; 69(4): A1-A18, 75-620. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.478>.
10. Nie G., Chan C., Yao J., He X. Asymptotic solution for nonlinear buckling of orthotropic shells on elastic foundation // *AIAA Journal*. 2009; 47-7: 1772-1783. <https://doi.org/10.2514/1.43311>.
11. Ashis Kumar Dutta, Jagat Jyoti Mandal, Debasish Bandyopadhyay. Application of Quintic Displacement Function in Static Analysis of Deep Beams on Elastic Foundation // *Architecture, Structures and Construction*. 2022; 2: 257–267.

12. Jingchao Wang, Zheng LiangLi, Wei Yu. 2019. Structural similitude for the geometric nonlinear buckling of stiffened orthotropic shallow spherical shells by energy approach // *Thin-Walled Structures*. 2018; 138: 430-457. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.02.006>.
13. Pankaj Thakur, Monika kumari Sethi. Elastoplastic Deformation in an Orthotropic Spherical Shell Subjected to a Temperature Gradient // *Mathematics and Mechanics of Solids*. 2020; 25(1):26-34. <https://doi.org/10.1177/1081286519857128>.
14. The influence of temperature differences for the analysis of thin orthotropic cylindrical shell / A. A. Treschev, M. V. Spasskaya, M. B. Shereshevsky, A. A. Bobrishev, L. N. Shafigullin // *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*. 2017; 26(4): 528 – 537. <https://doi.org/10.22630/PNIKS.2017.26.4.50>.
15. Tran Quoc Quan, Nguyen Huy Cuong, Nguyen Dinh Duc. Nonlinear buckling and post-buckling of eccentrically oblique stiffened sandwich functionally graded double curved shallow shells // *Aerospace Science and Technology*. 2019; 90: 169-180. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.04.037>.
16. Santanu Manna, Rahul Som. Flexural waves at the edge of nonlocal elastic plate associated with the Pasternak foundation // *Journal of Vibration and Control*. 2022. <https://doi.org/10.1177/10775463221141943>.
17. Bhattacharjee J., Anas Mubin. Stability of Slab on Elastic Foundation // *Part of the Lecture Notes in Civil Engineering book series (LNCE)*. 2021; 143: 6-31. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6969-6_31.
18. Andreev V. About one way of optimization of the thick-walled shells // *Applied Mechanics and Materials*. 2012; 166-169; 354-358.
19. Stupishin L.Y., Kolesnikov A.G., Nikitin K.E. Optimal design of flexible shallow shells on elastic foundation // *Journal of Applied Engineering Science*. 2017; 15(3): 349 - 353. <https://doi.org/10.5937/jaes15-14654>.
20. Ступишин Л.Ю., Колесников А.Г., Савельева Е.В. Восстановление эксплуатационных характеристик и несущей способности геометрически нелинейных пологих оболочек на упругом основании // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2016. № 3 (20). С. 129-134.
21. Stupishin L.Y., Kolesnikov A.G., Nikitin K.E. Variable form forming investigation for flexible shallow shells on circular base // *Asian Journal of Civil Engineering*. 2017; 8(2):163 - 171.

References

1. Maksymuk O. V., Sachuk Yu. V., Yatsyuk S. M. Plane Contact Problems for an Elastic Foundation with Two Bedding Coefficients. *Journal of Mathematical Sciences*. 2023. <https://doi.org/10.1007/s10958-023-06491-1>.

2. Straughan W. *Analysis of plates on elastic foundations*. Texas: Texas Tech University, 1980.
3. Wstawska I., Magnucki K., Kędzia P. Stability of three-layered beam on elastic foundation. *Thin-Walled Structures*. 2022; 175(6): 109208. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109208>.
4. Yangsheng YeShaowei, WeiDegou Cai. Calculation method for internal force and deformation of the prestressed I-beam on the elastic foundation. *Frontiers in Earth Science*. 2023; 10: 996876. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.996876>.
5. Tunay Uzbay Yelce Tunay, Uzbay Yelce Erdem, Balcı Erdem, Balcı Niyazi Özgür Bezgin Niyazi, Özgür Bezgin. A discussion on the beam on elastic foundation theory. *Challenge Journal of Structural Mechanics*. 2023; 9(1): 34-47. <https://doi.org/10.20528/cjsmec.2023.01.004>.
6. Sofiyev A. H., Turan F. 2021. On the nonlinear vibration of heterogenous orthotropic shallow shells in the framework of the shear deformation shell theory. *Thin-Walled Structures*. 2020 ; 161: 107181. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107181>.
7. Dao H, Nguyen D, Tran Q. Nonlinear vibration of imperfect eccentrically stiffened functionally graded double curved shallow shells resting on elastic foundation using the first order shear deformation theory. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2014; 80: 16 – 28. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.12.009>.
8. Nath Y., Jain. R. Non-linear dynamic analysis of shallow spherical shells on elastic foundations. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1983; 25: 409-419.
9. Saurabh Kumar Subhankar, Das Debabrata Gayen Ankita Joshi. Dynamic analysis on axially functionally graded plates resting on elastic foundation. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 69(4): A1-A18, 75-620. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.478>.
10. Nie G., Chan C., Yao J., He X. Asymptotic solution for nonlinear buckling of orthotropic shells on elastic foundation. *AIAA Journal*. 2009; 47-7: 1772-1783. <https://doi.org/10.2514/1.43311>.
11. Ashis Kumar Dutta, Jagat Jyoti Mandal, Debasish Bandyopadhyay. Application of Quintic Displacement Function in Static Analysis of Deep Beams on Elastic Foundation. *Architecture, Structures and Construction*. 2022; 2: 257–267.
12. Jingchao Wang, Zheng LiangLi, Wei Yu. 2019. Structural similitude for the geometric nonlinear buckling of stiffened orthotropic shallow spherical shells by energy approach. *Thin-Walled Structures*. 2018; 138: 430-457. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.02.006>.
13. Pankaj Thakur, Monika kumari Sethi. Elastoplastic Deformation in an Orthotropic Spherical Shell Subjected to a Temperature Gradient. *Mathematics and Mechanics of Solids*. 2020; 25(1):26-34. <https://doi.org/10.1177/1081286519857128>.
14. Treschev A. A. , Spasskaya M. V., Shereshevsky M. B., Bobrishev A. A., Shafigullin L. N. The influence of temperature differences for the analysis of thin orthotropic cylindrical shell. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*. 2017; 26(4): 528 – 537. <https://doi.org/10.22630/PNIKS.2017.26.4.50>.

15. Tran Quoc Quan, Nguyen Huy Cuong, Nguyen Dinh Duc. Nonlinear buckling and post-buckling of eccentrically oblique stiffened sandwich functionally graded double curved shallow shells. *Aerospace Science and Technology*. 2019; 90: 169-180. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.04.037>.
16. Santanu Manna, Rahul Som. Flexural waves at the edge of nonlocal elastic plate associated with the Pasternak foundation. *Journal of Vibration and Control*. 2022. <https://doi.org/10.1177/10775463221141943>.
17. Bhattacharjee J., Anas Mubin. Stability of Slab on Elastic Foundation. *Part of the Lecture Notes in Civil Engineering book series (LNCE)*. 2021; 143: 6-31. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6969-6_31.
18. Andreev V. About one way of optimization of the thick-walled shells. *Applied Mechanics and Materials*. 2012; 166-169; 354-358.
19. Stupishin L.Y., Kolesnikov A.G., Nikitin K.E. Optimal design of flexible shallow shells on elastic foundation. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017; 15(3): 349 - 353. <https://doi.org/10.5937/jaes15-14654>.
20. Stupishin L.Yu., Kolesnikov A.G., Savelyeva E.V. Vosstanovlenie ekspluatatsionnykh kharakteristik i nesushchei sposobnosti geometricheski nelineinykh pologikh obolochek na uprugom osnovanii [Restoration of operational characteristics and bearing capacity of geometrically nonlinear shallow shells on an elastic base]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2016, no. 3 (20), pp. 129-134.
21. Stupishin L.Y., Kolesnikov A.G., Nikitin K.E. Variable form forming investigation for flexible shallow shells on circular base. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2017; 18(2):163 - 171.

Информация об авторах / Information about the Authors

Колесников Александр Георгиевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра уникальных зданий и сооружений, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ag_kolesnikov@mail.ru, SPIN 7667-6685, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7874-3646>

Alexander G. Kolesnikov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ag_kolesnikov@mail.ru, SPIN 7667-6685, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7874-3646>

Иванов Андрей Александрович, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ag_kolesnikov@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-8564-5790>

Andrey A. Ivanov, Post Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ag_kolesnikov@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-8564-5790>

Система технического зрения в задаче определения расстояний от видеокамеры до объекта

М.В. Бобырь¹ ✉, С.Г. Емельянов¹, Н.А. Милостная¹

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

✉ e-mail: maxbobyry@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Разработка вычислительного процесса в системе технического зрения, позволяющего определять расстояние до объектов от одной видеокамеры на основе трансформации RGB данных, полученных от КМОП-видеокамеры, в трехмерные координаты, показывающие расположение объекта на 3d сцене.

Методы. Научная статья посвящена методам определения расстояний от видеокамеры до объектов, имеющих важное значение в области компьютерного зрения и когнитивного моделирования. Исследование охватывает разнообразные подходы, используемые для оценки расстояний с помощью видеоаналитики, традиционных моделей анализа изображений и машинного обучения. Рассматривается метод, основанный на классическом алгоритме детектирования маркеров, включающий новейший подход, реализующий принцип нейро-нечеткого обучения в системе технического зрения. Особое внимание уделяется визуальной оценке эффективности и точности предложенного нейро-нечеткого подхода при оценке передвижений исполнительных механизмов мехатронного комплекса. Это исследование предоставляет обзор современного состояния методов определения расстояний от видеокамеры до объектов и предложения по дальнейшему улучшению и развитию данной области.

Результаты. Предложенная в данном исследовании методология определения расстояний от системы технического зрения до объектов представляет собой значимый шаг в развитии методов позиционирования приводов мехатронных комплексов. Методология была апробирована в реальных условиях и продемонстрировала значительное улучшение точности позиционирования приводов. В ходе вычислительных экспериментов удалось в режиме реального времени определять трехмерные координаты (центр масс) детектируемых объектов. Это привело к улучшению позиционирования приводов мехатронного комплекса на 12% по сравнению с аналогичными решениями, что важно для достижения требуемых показателей производительности и эффективности производственной системы.

Заключение. Точность разработанной методологии была проверена на различных тестовых наборах данных, включая сценарии с различными условиями освещения, измененным фоном и распознаванием различных типов объектов. Результаты экспериментов подтвердили эффективность предложенной методики и её применимость в реальных условиях, обеспечивая улучшение точности позиционирования приводов мехатронного комплекса.

Ключевые слова: система технического зрения; триангуляция; стереозрение; нечеткая логика; детектирование объектов.

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

Финансирование: Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 23-21-00071 – «Разработка модели компьютерного зрения для интеллектуальной навигации робототехнических систем, основанной на построении трехмерных сцен по картам глубин».

Для цитирования: Бобырь М.В., Емельянов С.Г., Милостная Н.А. Система технического зрения в задаче определения расстояний от видеокамеры до объекта // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(3): 34-51. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-34-51>.

Поступила в редакцию 19.09.2023

Подписана в печать 09.10.2023

Опубликована 28.10.2023

Vision System in the Task of Determining Distances from the Video Camera to the Object

Maksim V. Bobyr ¹ ✉, Sergey G. Emelyanov ¹, Natalia A. Milostnaya ¹

¹ Southwest State University

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

✉ e-mail: maxbobyr@gmail.com

Abstract

Purpose of research. Development of a computational process in a vision system to determine the distance to objects from a single video camera based on the transformation of RGB data received from a CMOS video camera into three-dimensional coordinates showing the location of the object on the 3d scene.

Methods. The research paper focuses on methods for determining distances from a video camera to objects of significant importance in the field of computer vision and machine learning. The study covers a variety of approaches used for distance estimation using video analytics, traditional image analysis models and machine learning. A method based on the classical marker detection algorithm incorporating a recent approach that realizes the principle of neuro-fuzzy learning in a vision system is considered. Special attention is paid to the visual evaluation of the effectiveness and accuracy of the proposed neuro-fuzzy approach in estimating the movements of actuators of mechatronic complex. This study provides an overview of the current state of the art of methods for determining distances from a video camera to objects and suggestions for further improvement and development of this field.

Results. The methodology for determining distances from the vision system to objects proposed in this study represents a significant step in the development of methods for positioning actuators of mechatronic complexes. The methodology was tested in real conditions and demonstrated a significant improvement in the accuracy of actuator positioning. During computational experiments it was possible to determine in real time the three-dimensional coordinates (center of mass) of the detected objects. This led to a 12% improvement in the positioning of mechatronic drives compared to similar solutions, which is important for achieving the required performance and efficiency of the production system.

Conclusion. The accuracy of the developed methodology was tested on various test datasets, including scenarios with different lighting conditions, changed background and recognition of different types of objects. Experimental results confirmed the effectiveness of the proposed methodology and its applicability in real-world conditions, providing improved positioning accuracy of the mechatronic system actuators.

Keywords: *vision system; triangulation; stereo vision; fuzzy logic; object detection.*

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 Russian Science Foundation grant No. 23-21-00071 "Development of a computer vision model for intelligent navigation of robotic systems based on the construction of three-dimensional scenes based on depth maps".*

For citation: Bobyr M. V., Emelyanov S. G., Milostnaya N. A. Vision System in the Task of Determining Distances from the Video Camera to the Object. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(3): 34-51 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-34-51>.

Received 19.09.2023

Accepted 09.10.2023

Published 28.10.2023

Введение

Системы технического зрения (СТЗ) играют ключевую роль в области компьютерного зрения и автоматизации технологических процессов и производств, предоставляя важные данные, например, о местоположении объектов, их форме и различных других характеристиках. В последние годы значительное внимание уделяется разработке и совершенствованию методов определения расстояний от камеры до объектов [1]. Это имеет стратегическое значение во многих областях, таких как робототехника, автономные транспортные средства, промышленное производство, медицинская техника и многое другое.

Определение расстояний до объектов является ключевым компонентом для решения задачи позиционирования и оценки глубины в 3д сценах реальной среды. С течением времени методы определения расстояний значительно эволюционировали, благодаря применению различных методов, включая анализ изображений, стереозрение, ла-

зерное сканирование, использование инфракрасного и ультразвукового спектра, а также новейших моделей глубокого обучения [2].

Анализ классических методов определения расстояний от системы технического зрения до детектируемых объектов представляет собой важную часть исследования в области компьютерного зрения. Эти методы включают в себя различные техники и подходы, которые применяются для оценки глубины 3д сцены и расстояния до объектов. Проанализируем наиболее распространенные классические методы детектирования объектов и проведем их краткий анализ (рис. 1, табл. 1).

Триангуляция (Triangulation). Данный метод использует угловую информацию для расчета расстояний до объектов. Два известных угла (или направления) на видеокамеру позволяют определить треугольник между камерой и объектом, используя вышеуказанную геометрию [3, 4, 5].

Метод определения времени пролета (Time-of-Flight). В данном методе

измеряется время, которое необходимо для того, чтобы световой инфракрасный сигнал отразился от детектируемого объекта и вернулся к видеокамере. Измеренное время пропорционально расстоянию до объекта [6, 7]. Данный ме-

тод является глобальным методом и использует специализированную модель освещения (амбиентный свет – ambient light), в которой значение яркости каждой точки объекта зависит от других объектов 3d сцены.



Рис. 1. Классификация методов определения расстояний до детектируемых объектов

Fig. 1. Classification of methods for determining distances to detected objects

Разновидностями метода определения времени пролета являются следующие модели: инфракрасное зрение (Infrared Imaging) [8, 9, 10], лазерное сканирование (Laser Scanning) [11, 12] и ультразвуковое зрение (Ultrasonic Imaging) [13, 14].

В процессе инфракрасного зрения измеряется излучение, излучаемое объектами. При лазерном сканировании и ультразвуковом зрении определения времени, которое требуется лазерному или ультразвуковому сигналу, чтобы дойти и отразиться от детектируемой поверхности. На основе этого времени так же, как и в предыдущих моделях, рассчитывается расстояние до объекта.

Стереозрение (Stereovision). В данном методе используются две и более видеокамер с известным расстоянием

между ними для создания параллельных изображений сцены. Путем сравнения соответствующих точек на этих изображениях после построения карты глубин рассчитываются расстояния до объектов [15, 16, 17].

Метод маркеров (Marker-based) использует различные маркеры (например, QR-коды, цветные метки) на объектах для определения расстояний. Путем анализа размеров и положения маркеров на изображении рассчитываются центр масс распознанных объектов, а затем с помощью специализированных алгоритмов вычисляются расстояния до объектов [18, 19].

Каждый из этих классических методов имеет свои преимущества и ограничения (табл. 1), и выбор метода зави-

сит от конкретных потребностей приложения и условий сцены. Однако с развитием современных технологий, таких как глубокое обучение или нейро-нечеткое моделирование появляются новые под-

ходы, которые дополняют или улучшают классические методы определения расстояний до объектов, повышая точность путём комбинирования вышеуказанных подходов.

Таблица 1. Анализ преимуществ и недостатков моделей определения расстояний до объектов

Table 1. Analysis of the advantages and disadvantages of models for determining distances to objects

Метод / Method	Преимущества / Advantages	Недостатки / Disadvantages
Триангуляция	Применим к различным типам видеокамер и объектов	Точность зависит от угловой информации и стабильности измерений
Времени пролета	Быстрое измерение, широкий диапазон расстояний, высокая точность	Ограниченные углы обзора, ограниченная разрешающая способность
Инфракрасное зрение	Хорошо работает при низкой видимости и в различных условиях освещения	Диапазон измерений ограничен
Лазерное сканирование	Высокая точность	Требует прямой видимости объекта, не большие углы обзора
Ультразвуковое зрение	Хорошо работает в условиях низкой видимости	Ограниченная дальность измерений, подвержен влиянию помех
Стереозрение	Точные результаты, высокая разрешающая способность	Требует точной калибровки видеокамер, ограничен углами обзора, не достаточно точен при низком освещении
Метод маркеров	Высокая точность измерений, не высокая сложность вычислительного процесса	Требуется наличие маркеров на объектах, ограничен углами обзора

Цель данного исследования заключается в обзоре и анализе современных методов определения расстояний от видеокамеры до объектов, а также в разработке нового подхода, позволяющего улучшить

точность позиционирования приводов мехатронного комплекса. Предложенная методология призвана расширить функциональные возможности существующих систем технического зрения, обеспечивая

более точное позиционирование объектов в пространстве и способствуя развитию передовых технологий в области компьютерного зрения.

Материалы и методы

Работа системы технического зрения основана на обнаружении неподвижных и/или движущихся объектов в реальном времени, распознавании и анализе свойств найденных объектов на изображении. В зависимости от полученных данных СТЗ должны передавать результаты детектирования объектов на исполнительные механизмы мехатронных комплексов.

Для обработки видеоинформации СТЗ оснащаются соответствующими алгоритмами и специализированным программным обеспечением, причем данные приложения должны адаптироваться к изменению условий любого технологического процесса путем изменения структуры программного кода¹.

Процедура полученных данных из реальной среды в системе технического зрения состоит из следующих действий. Свет, отраженный детектируемым объектом, проходит через три оптических фильтра основных цветов (R-красный, G-зеленый, B-синий) (рис. 2а). Затем свет, поступивший на фотодиоды, преобразуется в электрический сигнал и затем в сумматоре объединяются в один сигнал

(рис. 2б). После этой процедуры создается цветное изображение, где каждый пиксель представлен тройкой значений ($R \in [0..255]$, $G \in [0..255]$, $B \in [0..255]$), соответствует уровням яркости каждого из основной составляющей цвета модели RGB.

Далее к полученному изображению возможно применить классические методы компьютерной обработки изображений:

1. Фильтрация изображения используется для удаления шумов на текстурах изображения. Могут включать использование статистических моделей и алгоритмы генерации текстур изображений [1].

2. Изменение контрастности изображения используется для увеличения разницы между яркостью соседних пикселей, делая объекты более видными. Примеры методов изменения контрастности на изображении включают следующие алгоритмы: линейное растяжение гистограммы и эквализация гистограммы [20, 21].

3. Выделение объектов на изображении, позволяет выделять объекты на изображении и отделять их от фона. Обычно включает использование методов пороговой обработки изображения и алгоритмов кластеризации [22, 23].

4. Распознавание образов используется для автоматического определения объектов на изображении и их классификации. Эта процедура может включать использование нейронных сетей и алгоритмов машинного обучения [24, 25].

¹ Милостная Н. А. Методология синтеза интеллектуальных высокопроизводительных нейронечетких систем технического зрения: дис. ... д-ра техн. наук. Курск, 2023. 350 с.

5. Сегментация изображений предназначена для разделения изображения на несколько регионов схожей формы или цвета. Примеры методов сегмента-

ции изображений включают использование алгоритма графовых разрезов и метода активных контуров [26, 27].

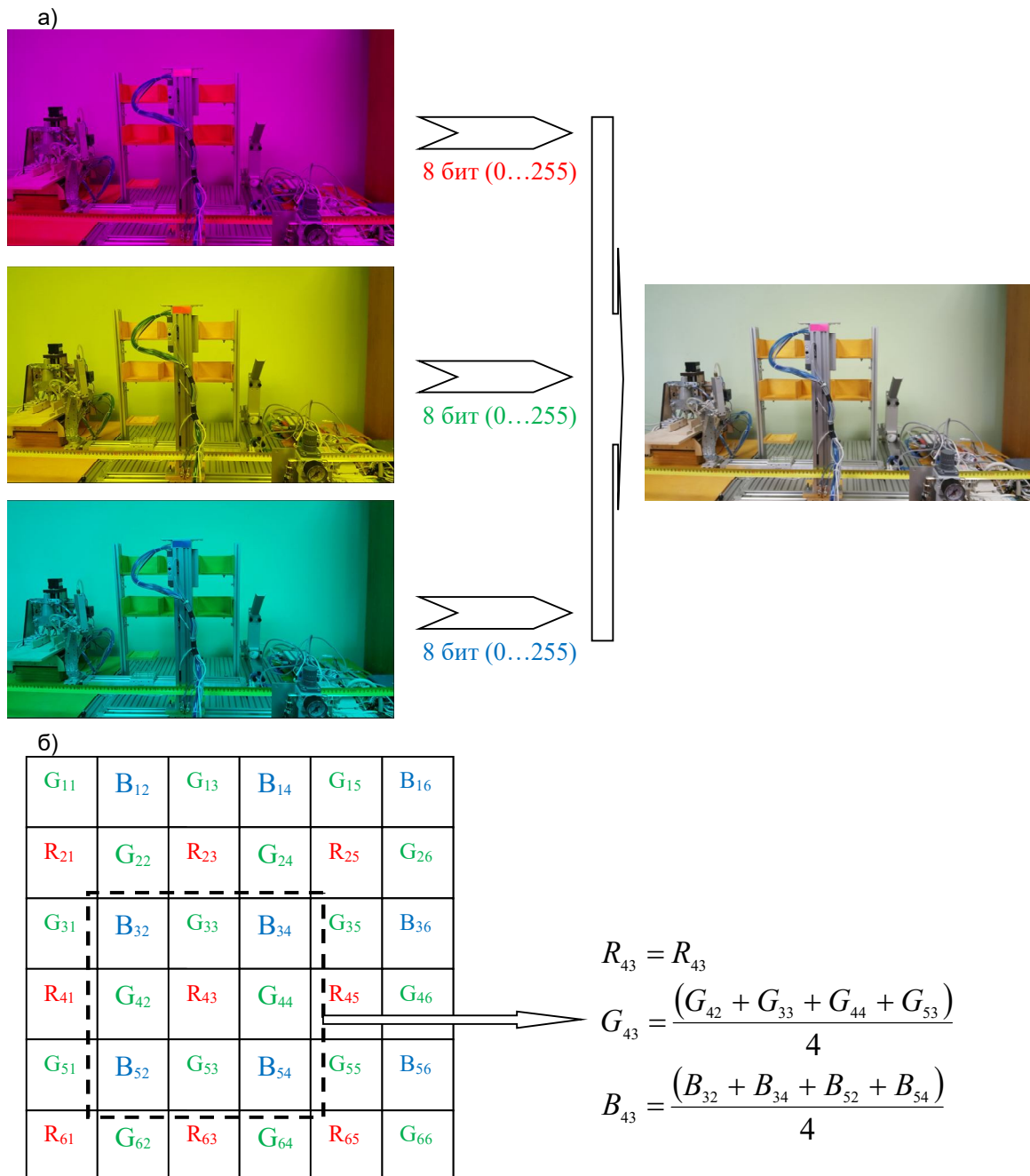


Рис. 2. Процесс построения RGB-изображения: **а** – трансформация 8-битных каналов по каждой составляющей цвета (красной, синей и зеленой); **б** – вычисление градаций цвета на RGB-изображении

Fig. 2. RGB image construction process: **a** – transformation of 8-bit channels for each color component (red, blue and green); **b** – calculation of color gradations on RGB image

6. Оптический поток позволяет определять скорость и направление движения объектов на видео. Примеры методов оптического потока включают алгоритмы Лукаса-Канаде и алгоритмы Хорна-Шунка [28, 29].

7. Синтез текстуры используется для генерации новых текстур на основе имеющихся изображений. Примеры методов синтеза текстуры включают использование статистических моделей и алгоритмов глубокого обучения нейронных сетей [30, 31].

С учетом вышесказанного была разработана методология синтеза СТЗ с использованием одной видеокамеры, состоящей из следующих этапов.

1. Получение и преобразование RGB изображения в цветовую модель HSV:

$$H = \begin{cases} \text{undefined,} & \text{if MAX} = \text{MIN}; \\ 60 \times \frac{G - B}{\text{MAX} - \text{MIN}} + 0^\circ, & \text{if MAX} = R \text{ and } G \geq B; \\ 60 \times \frac{G - B}{\text{MAX} - \text{MIN}} + 360^\circ, & \text{if MAX} = R \text{ and } G < B; \\ 60 \times \frac{B - R}{\text{MAX} - \text{MIN}} + 120^\circ, & \text{if MAX} = G; \\ 60 \times \frac{R - G}{\text{MAX} - \text{MIN}} + 240^\circ, & \text{if MAX} = B; \end{cases}$$

$$S = \frac{\text{MAX} - \text{MIN}}{1 - \left| 1 - \left(\frac{\text{MAX} + \text{MIN}}{S_f} \right) \right|},$$

где R, G, B – значения яркости цветов в модели RGB; MAX, MIN – экстремумы яркостей цветов; S_f – коэффициент нормализации; H – тон; S – насыщенность.

2. Расчет степеней принадлежности входных переменных: тон и насыщенность:

$$\mu_{x_i}(x_{ij}) = \text{trimf}(x_{ij}; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq a; \\ \frac{x_{ij} - a}{b - a}, & a \leq x_{ij} \leq b; \\ \frac{c - x_{ij}}{c - b}, & b \leq x_{ij} \leq c; \\ 0, & c \leq x_{ij}. \end{cases}$$

3. Создание базы нечетких знаний:

Fuzzy Rule: If (S) Low And (H) Negative, Then Cluster (N) equal N_1 .

4. Расчет номера кластера, соответствующего цветовой метке:

$$Cr_v = \left\lfloor \frac{\sum_{i=1}^{27} \alpha_i}{n} (N_{27} - N_{\text{active}}) \right\rfloor + N_{\text{active}}.$$

5. Бинаризация распознанной цветовой меткой:

$$I_B = \begin{cases} 1, & \text{if } Cr_v = N_{26} \parallel Cr_v = N_{17} \parallel \\ & \parallel Cr_v = N_8 (\text{color}) \\ 0, & \text{else} \end{cases}.$$

6. Фильтрация бинаризованного изображения:

$$I_F = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum_{l=1}^3 \sum_{p=1}^3 I_{Bl,p} \cdot \frac{\text{MAX} + 1}{k} \cdot m_{l,p} \geq T \\ 0, & \text{else} \end{cases}.$$

7. Определение центра масс детектируемого объекта:

$$\text{if } I_F = 1 \text{ then } X = \frac{\sum_{i=1}^w l_i}{\text{count}},$$

$$\text{if } I_F = 1 \text{ then } Y = \frac{\sum_{j=1}^h l_j}{\text{count}}.$$

8. Вычисление смещения центра масс детектируемого объекта по координатам XY:

$$DIST_x = \frac{(X_i - X_{i-1}) \cdot w_{real}}{w},$$

$$DIST_y = \frac{(Y_i - Y_{i-1}) \cdot h_{real}}{h},$$

9. Вычисление площади распознанной цветовой метки:

$$S = (x_2 - x_1) \times (y_2 - y_1).$$

10. Расчёт расстояния от видеокамеры до цветовой метки по Z координате:

$$Distance = 1299,84 \times S^{-0,46}.$$

Последовательное выполнение десяти этапов представленной методологии позволяет определять расстояние от видеокамеры до детектируемого объекта. Следует отметить, что предложенная методология основана на нейро-нечетком подходе [32, 33]

Результаты и их обсуждение

Предложенная методология вычисления расстояния от видеокамеры СТЗ до детектируемого объекта реализована на математической модели распознавания цветовой метки и была применена на практике в интеллектуальном пневматическом мехатронном комплексе [34]. В этом мехатронном комплексе (рис. 3) на управляемых пневматических приводах устанавливается прямоугольная розовая метка 2×4 см. Для регистрации положения исполнительных механизмов перед комплексом установлена видеокамера Pixy CMUcam5. Полученное изображение передается на компьютер, где в режиме реального времени осуществляется распознавание цветовой метки и определение ее положения в кадре для начального и последующего положений цилиндра.

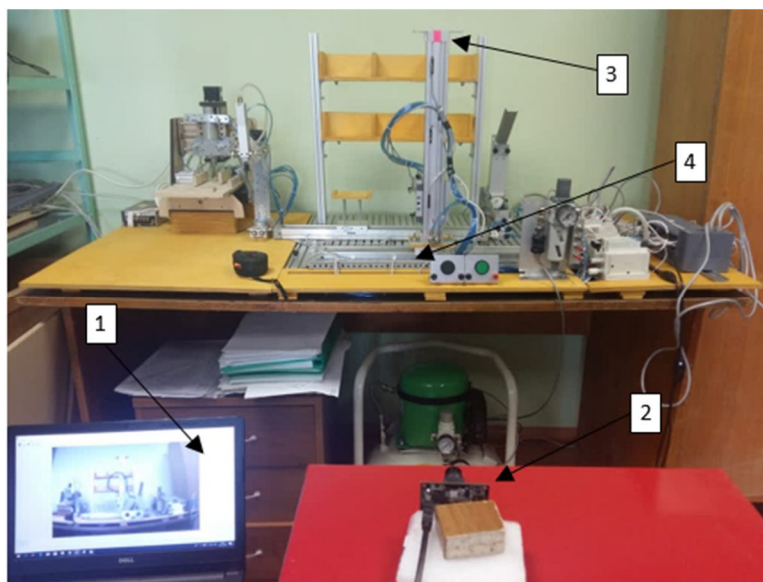


Рис. 3. Мехатронный комплекс с разработанной системой технического зрения: 1 – ПК; 2 – Pixy CMUcam5; 3 – цветовой маркер; 4 – управляемый пневматический привод

Fig. 3. Mechatronic complex with a developed technical vision system: 1 – PC; 2 – Pixy CMUcam5; 3 – color marker; 4 – controlled pneumatic actuator

В ходе проведения эксперимента отслеживалось перемещение пневмопривода с установленной на нем цветовой меткой. Регистрация показателей проводилась на расстояниях 10, 20, 30 и 35 сантиметров. В это время координаты центра масс цветовой метки, как по горизонтальному (ось абсцисс), так и вертикальному (ось ординат) направле-

ниям были вычислены с использованием 7 этапа предложенной методологии. Расстояние, на которое перемещался пневмопривод вдоль оси ХУ в составе мехатронного комплекса, вычислялось на 8 этапе методологии, а перемещение пневматического захвата вдоль оси аппликат (Z-координата) рассчитывалось на 10 этапе.

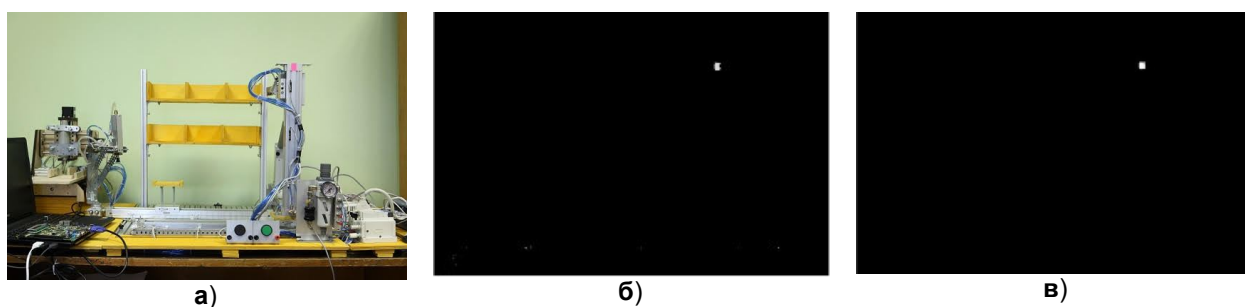


Рис. 4. Детектирование цветовой метки: **а** – начальное положение; **б** – бинаризация (этап 5); **в** – фильтрация (этап 6)

Fig. 4. Detecting a color mark: **a** – initial position; **b** – binarization (stage 5); **v** – filtration (stage 6)

Для анализа экспериментальных данных вычисляли два точностных показателя: MAPE (средняя абсолютная ошибка

в процентах) и точность по формуле Accuracy: $\text{Accuracy} = 1 - \text{MAPE}$ (табл. 2)¹.

Таблица 2. Экспериментальное исследование системы технического зрения

Table 2. Experimental study of a technical vision system

Длина, см	10	20	30	35
Минимальное, см	9,77	19,85	29,96	34,99
Максимальное, см	10,03	20,07	30,08	35,15
MAPE	0,0053	0,0032	0,0011	0,0024
Accuracy, %	99,47	99,68	99,89	99,76
		Средняя точность, %		
СТЗ		99,7		
Chaki, J. etc [35]		86		
Boukezzoula, R. etc [36]		85		

¹ Милостная Н. А. Методология синтеза интеллектуальных высокопроизводительных нейронечетких систем технического зрения: дис. ... д-ра техн. наук. Курск, 2023. 350 с.

Данные, представленные в табл. 2, свидетельствуют о том, что ошибка распознавания детектируемых объектов не превышает 0,3%. При этом точность метода распознавания цветowych меток на 12% превышает точность аналогов. Дальнейшим развитием направления работы планируется разработка рекомендаций для распараллеливания вычислительных процессов в представленной методологии [37].

Выводы

В научной статье представлена новая методология синтеза системы технического зрения, основанной на нейро-нечетком подходе и предназначенной для расчета расстояния до обнаруживаемых объектов. Кроме того, в статье проведен анализ уже существующих

методов определения расстояний до распознанных объектов.

В результате экспериментальных исследований было установлено, что точность предложенной методологии превышает точность аналогичных методов на 12%. Это свидетельствует о том, что предложенный нейро-нечеткий подход является более эффективным и перспективным в контексте решения задачи определения расстояний с использованием систем технического зрения. Полученные результаты в статье открывают новые горизонты для исследований и разработок в области компьютерного зрения и его применения в разнообразных сферах, таких как автоматизация технологических процессов и производств, робототехника и управление автономными роботизированными системами.

Список литературы

1. Потапов А. А., Гуляев Ю. В., Никитов С. А. Новейшие методы обработки изображений. М.: Физико-математическая литература, 2008. 496 с. ISBN 978-5-9221-0841-6.
2. 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. (Научная мысль). ISBN 978-5-16-017976-6. DOI 10.12737/1900641.
3. Быстрый алгоритм расшифровки изображения объекта в структурированном свете для измерения трёхмерного профиля в условиях нелинейности оптического тракта / С. В. Двойнишников, Г. В. Бакакин, В. А. Павлов, В. Г. Меледин // Измерительная техника. 2023. № 8. С. 36-41. DOI 10.32446/0368-1025it.2023-8-36-41.
4. Quantifying interfacial interactions for improved membrane antifouling: A novel approach using triangulation and surface element integration method / X. You, L. Shen, Y. Zhao, D. Ling Zhao, J. Teng, H. Lin, ... M. Zhang // Journal of Colloid and Interface Science. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.06.117>
5. Пешхоев А. А. Эффективность применения метода триангуляции с использованием Веасон маячков для определения местоположения внутри помещений // Вестник науки. 2019. Т. 4, № 5(14). С. 527-529.

6. Chen M., Bärwolff G., Schwandt H. Time-of-flight technology applied in pedestrian movement detection // In Transportation Research Procedia. 2014. Vol. 2. P. 189–194. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.09.028>
7. Klempt W. Review of particle identification by time of flight techniques // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 1999. Vol. 433. № 1-2. P. 542-553. DOI 10.1016/S0168-9002(99)00323-X.
8. Зарипова А. Д., Зарипов Д. К., Усачев А. Е. Визуализация дефектов высоковольтных изоляторов на инфракрасных изображениях с помощью методов компьютерного зрения // Научная визуализация. 2019. Т. 11, № 2. С. 88-98. DOI 10.26583/sv.11.2.07.
9. Гераськин Д. П. Количественная оценка эффективности инфракрасной системы технического зрения медицинского работника тепловизионной диагностики // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2000. № 2. С. 93-96.
10. Объективное определение остроты зрения у пациентов с поражением макулярной области с помощью инфракрасной видеонистагмографии / Е. П. Поручикова, З. И. Мамедов, И. А. Лоскутов, О. Л. Поручикова // Эффективная фармакотерапия. 2022. Т. 18, № 45. С. 6-13. DOI 10.33978/2307-3586-2022-18-45-6-12.
11. Смирнов Д. А., Тер-Саакян А. С., Делендик А. М. Алгоритм начальной выставки управляемых летательных аппаратов с помощью бортовой системы технического зрения и наземного лазерного маяка // Авиационные системы в XXI веке: тезисы докладов юбилейной Всероссийской научно-технической конференции. М.: Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, 2022. С. 139-140.
12. Елистратов В. В. Об использовании лазерных устройств технического зрения на автомобильной технике // Аспирант и соискатель. 2007. № 3(40). С. 126.
13. Борисов Е. Г. Комбинированная телевизионно - ультразвуковая система технического зрения // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2011. № 1. С. 91-99.
14. Данишевский О. В., Парфенов А. В., Станкевич В. В. Современные решения робототехнического зрения универсальной кибернетической платформы // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 5. С. 32-38.
15. Аврашков П. П., Коськин Н. А., Константинов И. С. Оценка эффективности различных моделей конвертации изображений в стереоформат с помощью карт глубины // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 12. С. 165-168.
16. 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. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105629>

17. Бобырь М. В., Архипов А. Е., Милостная Н. А. Метод расчета карты глубин на основе мягких операторов // Системы и средства информатики. 2019. Т. 29, вып. 2. С. 71–84. <https://doi.org/10.14357/08696527190207>
18. Бобырь М. В., Архипов А. Е., Якушев А. С. Распознавание оттенка цветовой метки на основе нечёткой кластеризации // Информатика и автоматизация. 2021. № 20(2). С. 407-434.
19. Нечетко-логические методы в задаче детектирования границ объектов / М. В. Бобырь, А. Е. Архипов, С. В. Горбачев [и др.] // Информатика и автоматизация. 2022. Т. 21, № 2. С. 376-404. DOI 10.15622/ia.21.2.6.
20. Растяжение гистограммы // CoderLessons. 2022. URL: <https://coderlessons.com/tutorials/akademicheskii/tsifrovaia-obrabotka-izobrazhenii/rastiazhenie-gistogrammy>.
21. Эквализация гистограмм // LightHouse Software. 2022. URL: <https://lhs-blog.info/programming/dlang/ekvalizacziya-gistogramm/>.
22. Обработка изображения // NDT-testing. 2022. URL: <https://ndt-testing.ru/porogovaja-obrabotka-izobrazhenij.html>.
23. Простейшая кластеризация изображений методом к-средних // Habr. 2022. URL: <https://habr.com/ru/articles/165087/>.
24. Распознавание образов с помощью искусственного интеллекта // Habr. 2023. URL: <https://habr.com/ru/articles/709432/> (Дата обращения 25.01.2023).
25. Киселева Т. В., Маслова Е. В., Бычков А. Г. Машинное обучение для решения задач распознавания образов // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2021. № 2(18). С. 19-24. doi: 10.47501/itnou.2021.2.19-24
26. Белим С. В., Ларионов С. Б. Сегментация изображений на основе алгоритма выделения сообществ на графе // Математические структуры и моделирование. 2016. № 3(39). С. 74-85.
27. Сорокин Д. В., Крылов А. С. Метод активных контуров для сегментации изображений. М.: МАКС Пресс, 2022. 16с.
28. Вычисление оптического потока методом Лукаса-Канаде // Habr. 2023. URL: <https://habr.com/ru/articles/169055/>.
29. Чигринский В. В., Матвеев И. А. Исследование движения структуры радужной оболочки глаза методом оптического потока // Математические методы распознавания образов. 2017. Т. 18. № 1. С. 108-109.
30. Белоконь А. В., Проскурин А. В., Фаворская М. Н. Классификация методов синтеза текстур // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2011. Т. 1. № 7. С. 350-351.
31. Синтез изображений с помощью глубоких нейросетей // Компьютерные науки. 2023. URL: https://youtu.be/_rfmEzb6YP4.

32. 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. DOI 10.1016/j.asoc.2022.108449.

33. 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. DOI 10.1016/j.asoc.2019.106030.

34. Бобырь М.В., Дородных А.А., Якушев А.С. Устройство и программная модель управления пневматическим мехатронным комплексом // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2018;19(9):612-617. <https://doi.org/10.17587/mau.19.612-617>

35. Fragmented plant leaf recognition: Bag-of-features, fuzzy-color and edge-texture histogram descriptors with multi-layer perceptron / J. Chaki, N. Dey, L. Moraru, F. Shi // *Optik*. 2019. № 181. Pp. 639–650. doi:10.1016/j.ijleo.2018.12.107

36. Boukezzoula R., Coquin D., Nguyen T. L., Perrin S. Multi-sensor information fusion: Combination of fuzzy systems and evidence theory approaches in color recognition for the NAO humanoid robot // *Robotics and Autonomous Systems*. 2018. № 100. Pp. 302–316. Doi:10.1016/j.robot.2017.12.002

37. Bobyr M. V., A Yakushev. S., Dorodnykh A. A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA // *Measurement*. 2020. Vol. 152. P. 107378. DOI 10.1016/j.measurement.2019.107378.

References

1. Potapov A. A., Gulyaev Yu. V., Nikitov S. A. *Noveishie metody obrabotki izobrazhenii* [Newest methods of image processing]. Moscow, Fiziko-matematicheskaya literatura, 2008. 496 p. ISBN 978-5-9221-0841-6.

2. Bobyr M. V., Emel'yanov S. G., Arkhipov A. E., Milostnaya N. A. *Prikladnye neuro-nechetkie vychislitel'nye sistemy i ustroystva* [Applied neuro-fuzzy computing systems and devices]. Moscow, Infra-M Publ., 2023, 263 p. ISBN 978-5-16-017976-6. DOI 10.12737/1900641.

3. Dvoinishnikov S. V., Bakakin G. V., Pavlov V. A., Meledin V. G. Bystryi algoritm rasshifrovki izobrazheniya ob"ekta v strukturirovannom svete dlya izmereniya trekhmernogo profilya v usloviyakh nelineinosti opticheskogo trakta [Fast algorithm for deciphering an object image in structured light for measuring a three-dimensional profile in conditions of non-linearity of the optical path]. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technology*, 2023, no. 8, pp. 36-41. DOI 10.32446/0368-1025it.2023-8-36-41.

4. You X., Shen L., Zhao Y., Ling Zhao D., Teng J., Lin H., ... Zhang M. Quantifying interfacial interactions for improved membrane antifouling: A novel approach using triangulation and surface element integration method. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.06.117>.

5. Peshkhoev A. A. Effektivnost' primeneniya metoda triangulyatsii s ispol'zovaniem Beacon mayachkov dlya opredeleniya mestopolozheniya vnutri pomeshchenii [Efficiency of using the triangulation method using Beacon beacons for determining location indoors]. *Vestnik nauki = Bulletin of Science*, 2019, vol. 4, no. 5(14), pp. 527-529.

6. Chen M., Bärwolff G., & Schwandt H. Time-of-flight technology applied in pedestrian movement detection. In *Transportation Research Procedia*, 2014, vol. 2, pp. 189–194. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.09.028>

7. Klempt W. Review of particle identification by time of flight techniques. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1999, vol. 433, no. 1-2, pp. 542-553. DOI 10.1016/S0168-9002(99)00323-X.

8. Zaripova A. D., Zaripov D. K., Usachev A. E. Vizualizatsiya defektov vysokovol'tnykh izolyatorov na infrakrasnykh izobrazheniyakh s pomoshch'yu metodov komp'yuternogo zreniya [Visualization of defects in high-voltage insulators on infrared images using computer vision methods]. *Nauchnaya vizualizatsiya = Scientific Visualization*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 88-98. DOI 10.26583/sv.11.2.07.

9. Geraskin D. P. Kolichestvennaya otsenka effektivnosti infrakrasnoi sistemy tekhnicheskogo zreniya meditsinskogo rabotnika teplovizionnoi diagnostiki [Quantitative assessment of the effectiveness of the infrared technical vision system of a medical worker for thermal imaging diagnostics]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Proceedings of Higher Educational institutions. Electromechanics*, 2000, no. 2, pp. 93-96.

10. Poruchikova E. P., Mamedov Z. I., Loskutov I. A., Poruchikova O. L. Ob"ektivnoe opredelenie ostroty zreniya u patsientov s porazheniem makulyarnoi oblasti s pomoshch'yu infrakrasnoi videonistagmografii [Objective determination of visual acuity in patients with damage to the macular area using infrared videonystagmography]. *Effektivnaya farmakoterapiya = Effective Pharmacotherapy*, 2022, vol. 18, no. 45, pp. 6-13. DOI 10.33978/2307-3586-2022-18-45-6-12.

11. Smirnov D. A., Ter-Sahakyan A. S., Delendik A. M. [Algorithm for the initial exhibition of controlled aircraft using an on-board technical vision system and a ground-based laser beacon]. *Aviatsionnye sistemy v XXI veke: Tezisy dokladov yubileinoi Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Aviation systems in the XXI century. Reports of scientific and technical conference]. Moscow, State Research Institute of Aviation Systems Publ., 2022, pp. 139-140 (In Russ.).

12. Elistratov V.V. Ob ispol'zovanii lazernykh ustroystv tekhnicheskogo zreniya na avtomobil'noi tekhnike [On the use of laser technical vision devices on automotive vehicles]. *Aspirant i soiskatel' = Graduate Student and Applicant*, 2007, no. 3(40), 126 p.

13. Borisov E. G. Kombinirovannaya televizionno - ul'trazvukovaya sistema tekhnicheskogo zreniya [Combined television - ultrasonic technical vision system]. *Voprosy radi-*

oelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya = Issues of Radio Electronics. Series: Television technology, 2011, no. 1, pp. 91-99.

14. Danishevsky O. V., Parfenov A. V., Stankevich V. V. Sovremennye resheniya robototekhnicheskogo zreniya universal'noi kiberneticheskoi platformy [Modern solutions of robotic vision of a universal cybernetic platform]. *Voprosy radioelektroniki = Issues of Radio Electronics*, 2019, no. 5, pp. 32-38.

15. Avrashkov P. P., Koskin N. A., Konstantinov I. S. Otsenka effektivnosti razlichnykh modelei konvertatsii izobrazhenii v stereoformat s pomoshch'yu kart glubiny [Evaluating the effectiveness of various models for converting images into stereo format using depth maps]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*, 2020, no. 12, pp. 165-168.

16. 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. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105629>

17. Bobyr M. V., Arkhipov A. E., Milostnaya N. A. Metod rascheta karty glubin na osnove myagkikh operatorov [Method for calculating depth maps based on soft operators]. *Sistemy i sredstva informatiki = Systems and Informatics Tools*, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 71-84. <https://doi.org/10.14357/08696527190207>.

18. Bobyr M. V., Arkhipov A. E., Yakushev A. S. Raspoznavanie ottenka tsvetovoi metki na osnove nechetkoi klasterizatsii [Recognition of the shade of a color mark based on fuzzy clustering]. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation*, 2021, no 20(2), pp. 407-434.

19. Bobyr M. V., Arkhipov A. E., Gorbachev S. V. [et al.] Nechetko-logicheskie metody v zadache detektirovaniya granits ob"ektov [Fuzzy logical methods in the problem of detecting object boundaries]. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation*, 2022, vol. 21, no. 2, pp. 376-404. DOI 10.15622/ia.21.2.6.

20. *Rastyazhenie gistogrammy* [Histogram stretching]. CoderLessons: [website]. 2022. URL: <https://coderlessons.com/tutorials/akademicheskii/tsifrovaia-obrabotka-izobrazhenii/rastiazhenie-gistogrammy>.

21. *Ekvalizatsiya gistogramm* [Histogram equalization]. LightHouse Software: [website]. 2022. URL: <https://lhs-blog.info/programming/dlang/ekvalizatsiya-gistogramm/>.

22. *Obrabotka izobrazheniya* [Image processing]. NDT-testing: [website]. 2022. URL: <https://ndt-testing.ru/porogovaja-obrabotka-izobrazhenij.html>.

23. Prosteishaya klasterizatsiya izobrazhenii metodom k-srednikh [The simplest image clustering using the k-means method]. *Habr*. 2022. URL: <https://habr.com/ru/articles/165087/>.

24. Raspoznavanie obrazov s pomoshch'yu iskusstvennogo intellekta [Pattern recognition using artificial intelligence]. *Habr*. 2023. URL: <https://habr.com/ru/articles/709432/> (Access date: 25.01.2023).

25. Kiseleva T.V., Maslova E.V., Bychkov A.G. Mashinnoe obuchenie dlya resheniya zadach raspoznavaniya obrazov [Machine learning for solving pattern recognition problems]. *ITNOU: Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii* = *ITNOU: Information technologies in science, education and management*, 2021, no. 2(18), pp. 19-24. doi: 10.47501/itnou.2021.2.19-24
26. Belim S. V., Larionov S. B. Segmentatsiya izobrazhenii na osnove algoritma vydeleniya soobshchestv na grafe [Image segmentation based on an algorithm for identifying communities on a graph]. *Matematicheskie struktury i modelirovanie* = *Mathematical Structures and Modeling*, 2016, no. 3(39), pp. 74-85.
27. Sorokin D. V., Krylov A. S. *Metod aktivnykh konturov dlya segmentatsii izobrazhenii* [Method of active contours for image segmentation]. Moscow, MAX Press Publ., 2022, 16 p. ISBN 978-5-317-06761-8.
28. Vychislenie opticheskogo potoka metodom Lukasa-Kanade [Calculation of optical flow by the Lucas-Kanade method]. Habr. 2023. URL: <https://habr.com/ru/articles/169055/>.
29. Chigrinsky V.V., Matveev I.A. Issledovanie dvizheniya struktury raduzhnoi obolochki glaza metodom opticheskogo potoka [Study of the movement of the structure of the iris of the eye using the optical flow method]. *Matematicheskie metody raspoznavaniya obrazov* = *Mathematical Methods of Pattern Recognition*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 108-109.
30. Belokon A.V., Proskurin A.V., Favorskaya M.N. Klassifikatsiya metodov sinteza tekstur [Classification of texture synthesis methods]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики* = *Current Problems of Aviation and Astronautics*, 2011, vol. 1, no. 7, pp.
31. Sintez izobrazhenii s pomoshch'yu glubokikh neirosetei [Image synthesis using deep neural networks]. *Komp'yuternye nauki* = *Computer Science*. 2023. URL: https://youtu.be/_rfmEzb6YP4.
32. 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, 108449 p. DOI 10.1016/j.asoc.2022.108449.
33. Bobyr M. V., Emelyanov S. G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems. *Applied Soft Computing*, 2020, vol. 88, 106030 p. DOI 10.1016/j.asoc.2019.106030.
34. Bobyr M.V., Dorodnykh A.A., Yakushev A.S. Ustroistvo i programmnaya model' upravleniya pnevmaticheskim mekhatronnym kompleksom [Device and software model for controlling a pneumatic mechatronic complex]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* = *Mechatronics, Automation, Control*, 2018, no. 19(9), pp. 612-617. <https://doi.org/10.17587/mau.19.612-617>.
35. Chaki J., Dey N., Moraru L., Shi F. Fragmented plant leaf recognition: Bag-of-features, fuzzy-color and edge-texture histogram descriptors with multi-layer perceptron. *Optik*, 2019, no. 181, pp. 639–650. DOI:10.1016/j.ijleo.2018.12.107

36. Boukezzoula R., Coquin D., Nguyen T. L., Perrin S. Multi-sensor information fusion: Combination of fuzzy systems and evidence theory approaches in color recognition for the NAO humanoid robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, no. 100, pp. 302–316. Doi:10.1016/j.robot.2017.12.002

37. 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, pp. 107378. DOI 10.1016/j.measurement.2019.107378.

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

Емельянов Сергей Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, ректор, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: rector@swsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3012-0383>, Researcher ID: E-3511-2013

Sergei G. Emelianov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Rector, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: rector@swsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3012-0383>, Researcher ID: E-3511-2013

Милостная Наталья Анатольевна, кандидат 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, Cand. 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>

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-52-65>

Разработка эргономичного приложения-помощника на основе нейронной сети

Д.С. Савенков¹, С.Ю. Поздняков¹, А.А. Кузьменко¹,
Р.А. Филиппов¹, Л.Б. Филиппова¹ ✉

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

✉ e-mail: libv88@mai.ru

Резюме

Целью работы является разработка структурированной модели для обучения нейронной сети на основе электронной энциклопедии.

Методы. В данной работе были использованы методы для анализа текстовых статей: 1) TF-IDF – это статистическая мера, используемая для оценки важности термов в документе относительно корпуса документов. Она вычисляет относительную важность термов, учитывая частоту их появления в документе или всем корпусе документов. TF-IDF позволяет выделить ключевые термины, которые характеризуют содержание каждого документа. 2) Кластеризация методом *k*-средних++ – это метод машинного обучения, применяемый для разделения объектов на группы (кластеры) на основе их сходства. Этот метод позволил создать новые категории статей на основе их содержания. 3) Метод *t*-SNE – это метод визуализации сложных многомерных данных в двух или трех измерениях.

Результаты. Анализ текстовых статей с использованием методов обработки естественного языка, таких как TF-IDF, и их кластеризация методом *k*-средних++ позволяют создать новые категории статей на основе их содержания. В данной работе был получен результирующий график кластеризации, который показал хорошо разделенные кластеры с высокой точностью.

Заключение. Для анализа уникальности триграмм в статьях были использованы значения TF-IDF. Триграммы были классифицированы на различные группы уникальности, что позволяет выявить области, где статьи содержат высокую уникальность триграмм. Комбинации различных групп уникальности могут указывать на разные тематические аспекты или контексты в текстах. Дополнительно, с помощью метода *t*-SNE был получен график кластеризации, который визуально выделяет новые категории статей. Этот график помогает наглядно представить структуру кластеров и их взаимное расположение в двух измерениях. Таким образом, исследование позволяет более глубоко понять и систематизировать содержание статей и выделить связи между ними.

Ключевые слова: кластеризация; *k*-средних++; метрика силуэта; обработка естественного языка; метод *t*-SNE.

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

Для цитирования: Разработка эргономичного приложения-помощника на основе нейронной сети / Д.С. Савенков, С.Ю. Поздняков, А.А. Кузьменко, Р.А. Филиппов, Л.Б. Филиппова // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(3): 52-65. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-52-65>.

Поступила в редакцию 09.08.2023

Подписана в печать 03.10.2023

Опубликована 28.10.2023

© Савенков Д.С., Поздняков С.Ю., Кузьменко А.А., Филиппов Р.А., Филиппова Л.Б., 2023

Development of an Ergonomic Assistant Application Based on a Neural Network

Danila S. Savenkov ¹, Semin Yu. Pozdnyakov ¹, Alexander A. Kuzmenko ¹,
Rodion A. Filippov ¹, Lyudmila B. Filippova ¹ ✉

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

✉ e-mail: libv88@mai.ru

Abstract

Purpose of research is to develop a structured model for training a neural network based on an electronic encyclopedia.

Methods. In this work, methods were used to analyze text articles: 1) TF-IDF is a statistical measure used to assess the importance of terms in a document relative to the corpus of documents. It calculates the relative importance of terms, taking into account the frequency of their appearance in a document or the entire corpus of documents. TF-IDF allows you to highlight the key terms that characterize the content of each document. 2) Clustering by k-means++ is a machine learning method used to divide objects into groups (clusters) based on their similarity. This method made it possible to create new categories of articles based on their content. 3) The t-SNE method is a method of visualizing complex multidimensional data in two or three dimensions.

Result. The analysis of text articles using natural language processing methods, such as TF-IDF, and their clustering by the k-means++ method allow you to create new categories of articles based on their content. In this paper, the resulting clustering graph was obtained, which showed well-separated clusters with high accuracy.

Conclusion. TF-IDF values were used to analyze the uniqueness of trigrams in the articles. The trigrams were classified into various uniqueness groups, which allows us to identify areas where articles contain high uniqueness of trigrams. Combinations of different uniqueness groups may indicate different thematic aspects or contexts in the texts. Additionally, using the t-SNE method, a clustering graph was obtained that visually highlights new categories of articles. This graph helps to visualize the structure of clusters and their mutual location in two dimensions. Thus, the study allows a deeper understanding and systematization of the content of articles and highlight the links between them.

Keywords: clustering; k-means++; silhouette metrics; natural language processing; t-SNE 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: Savenkov D. S., Pozdnyakov S. Yu., Kuzmenko A. A., Filippov R. A., Filippova L. B. Development of an Ergonomic Assistant Application Based on a Neural Network. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(3): 52-65 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-52-65>.

Received 09.08.2023

Accepted 03.10.2023

Published 28.10.2023

Введение

Актуальность разработки структуры модели по электронной энциклопедии выражается в ряде аспектов:

Электронная энциклопедия – один из самых крупных источников данных, содержащий много статей по разным направлениям. Используя эти данные, обогатит модель большим объемом информации, что способствует повышению ее точности и эффективности.

В электронной энциклопедии существует структурированная организация статей, в которой содержатся связи между разными темами и категориями. Эту структуру можно использовать для того, чтобы создать семантическую модель, позволяющую устанавливать взаимосвязи между понятиями и понять их контекст. Эта модель может пригодиться для обучения нейронных сетей, в частности, в области классификации, поисковых систем и синтаксического анализа текста.

Применение электронной энциклопедии для создания структуры модели способствует доступности и понятности результатов обучения нейронных сетей, поскольку электронная энциклопедия написана на языке понятном большинству пользователей, ее результаты можно представить в виде информации, которую люди легко интерпретируют и используют в различных областях, таких как принятие решений, изучение

новых тем и получение новой информации.

Исходя из вышеперечисленных аспектов можно сделать вывод, что создание структурированной модели для нейронных сетей на основе электронной энциклопедии актуально, в связи с тем, что позволяет применять обширную информацию, структурированную связь между терминами и обеспечивать доступность и понятность результатов для пользователей.

В заключении научной работы Ермакова П. Д. «Исследование методов машинного обучения в задаче автоматического определения тональности текстов на естественном языке», говорится, что удаление стоп-слов и стемминг уменьшают точность работы методов машинного обучения, а использование биграмм и триграмм не сказываются на ней. Исходя из этого, использование n-грамм для модели будет предпочтительней использования униграмм [1].

Шокина М. О в научной статье «Применение алгоритма k-means++ для кластеризации последовательностей с неизвестным количеством кластеров» пришла к выводу о том, что использование алгоритма k-средние++ является быстрым и точным методом решения задачи кластеризации, с неизвестным количеством кластеров [2].

В работе Крижановского А. А «Преобразование структуры словарной статьи словаря электронной библиотеки в таб-

лицы и отношения реляционной базы данных» сделан вывод, что статьи электронной энциклопедии имеют жёсткую структуру, что позволяет легко извлекать информацию из этого ресурса [3].

На основе результатов, полученных из статьи Частиковой В.А. «Применение методов кластеризации для повышения точности работы нейронных сетей», можно сделать вывод, что оптимальнее использовать кластеризованную нейронную сеть с использованием алгоритма *k-means++*, потому что: повышается точность работы нейронной сети, а также возможно реализация параллельных вычислений [4].

В своей работе Соболева Е. Д. «Визуализация многомерных наборов данных при помощи алгоритмов снижения пространства признаков *pca* и *t-sne*», говорит о том, что в зависимости от задачи необходимо выбирать метод снижения размерности данных по условиям задачи. В этой работе будет использован метод *t-sne* [5,6].

На основе рассмотренных научных работ, было принято решение, разбить очищенный дамп электронной энциклопедии на биграммы и триграммы, а также провести кластеризацию по ним с использованием алгоритма *k-средних++* и метода снижения размерности данных *t-SNE*.

Достаточно большое число работ рассматривает проблемы моделирования удобных интерфейсных приложений и у рациональных алгоритмов [7, 10, 11, 12, 15]. Однако разработка интеллектуальных помощников с приме-

нением современных методов эргономического анализа, оценивающих удобство трудовой деятельности операторов, проводится не так часто [8, 13, 14]. В рамках данной статьи нами рассматриваются подходы к разработке дашборда для интеллектуальной системы. Основные направления анализа данных [9, 16, 17, 18, 19, 20], с которыми может в дальнейшем работать система, будут учитываться при проектировании итоговой архитектуры.

Материалы и методы

На начальном этапе был обработан набор данных по статьям русской электронной энциклопедии, представленный в виде XML файла с разметкой тегов, которые представлены в табл. 1.

Следующим шагом является формирование очищенного набора данных от разметки. В результате получается новый XML файл со структурой, представленной в табл. 2.

Для проведения кластерного анализа текстовой информации необходимо преобразовать тексты в числовые векторы [7]. Для решения поставленной задачи будет использоваться статистическая мера *TF-IDF* на основе триграмм. Выбор триграмм обусловлен несколькими причинами:

- Контекстуальная информация. Триграммы позволяют учитывать взаимосвязь и контекст слов.
- Расширенный словарь. Использование триграмм позволяет расширять словарь и увеличить количество уникальных комбинаций слов.

- Учет контекстных зависимостей.

Использование триграмм при анализе текста позволяет находить контекстные зависимости между словами.

- Устранение неоднозначности. Три-

граммы помогают устранить неоднозначность некоторых слов, так как контекст может дать ясное понимание их значения.

Таблица 1. Структура статьи набора данных русской электронной энциклопедии

Table 1. The structure of the article of the data set of the Russian electronic encyclopedia

Наименование тега / Tag name	Вложенный тег / Nested tag	Значение / Value
title	title	Содержит заголовок страницы и указывает на название статьи в электронной энциклопедии
ns	ns	Указывает на пространство имён, к которому принадлежит страница
revision	revision	Содержит информацию о последней версии статьи
	id	Содержит уникальный идентификатор ревизии статьи
	parentid	Содержит идентификатор ревизии, являющейся предшественником текущей ревизии
	timestamp	Указывает на временную метку, когда была создана или отредактирована ревизия
contributor	contributor	Содержит информацию о вкладе пользователя в ревизию
	username	Содержит имя пользователя, внесшего вклад
	id	Содержит уникальный идентификатор пользователя
comment		Содержит комментарий, связанный с ревизией статьи
model		Указывает на модель контента, используемую для представления текста статьи
format		Указывает на формат файла, в котором хранится содержимое страницы
text		Содержит текст статьи

Таблица 2. Структура статьи очищенного дампа русской электронной энциклопедии

Table 2. The structure of the article of the cleaned dump of the Russian electronic encyclopedia

Наименование тега / Tag name	Значение / Value
title	Содержит заголовок страницы и указывает на название статьи в электронной энциклопедии
text	Содержит очищенный текст статьи

TF-IDF – это статистическая мера, используемая в области обработки естественного языка для оценки важности термов в документе относительно корпуса документов.

TF (частота термина) отражает, насколько часто терм (слово или фраза) встречается внутри конкретного документа. TF рассчитывается путем подсчета количества вхождений термина в документ и деления этого числа на общее количество термов в документе:

$$tf(t,d) = \frac{n_t}{\sum_k n_k}, \quad (1)$$

где n_t – число вхождений слова t в документ; $\sum_k n_k$ – общее число слов в данном документе.

IDF (обратная частота документа) отражает важность термина в контексте всего корпуса документов [8]. IDF рассчитывается путем деления общего количества документов в корпусе на количество документов, в которых встречается данный терм, а затем применяется логарифмическая функция к полученному результату:

$$idf(t,D) = \log \frac{|D|}{|\{d_i \in D \mid t \in d_i\}|}, \quad (2)$$

где $|D|$ – число документов в коллекции, $|\{d_i \in D \mid t \in d_i\}|$ – число документов из коллекции D , в которых встречается t (когда $n_t \neq 0$).

TF-IDF комбинирует TF и IDF, умножая их значения. В результате получается числовая оценка, которая указывает на важность термина в конкретном документе относительно всего корпуса

$$td-idf(t,D) = tf(t,d) \times idf(t,D). \quad (3)$$

Термы с высоким значением TF-IDF считаются более репрезентативными и информативными для данного документа.

Следующим этапом была кластеризация методом k -средних++.

Метод k -средних++ — это модификация метода k -средних, он применяется для эффективного и стабильного инициирования начальных кластерных центров. Он помогает избавиться от проблемы неудачной инициализации, которая приводит к сходимости с нежелательным локальным оптимумом [9].

Процесс инициализации в методе k -средних++ отличается от стандартного метода k -средних. Рассмотрим алгоритм метода:

1. Первый центроид случайно выбирается из всех точек данных.
2. Для каждой точки данных квадратное евклидово расстояние вычисляется до ближайшего выбранного центроида.
3. Выбирается новый центроид с вероятностью, равной квадрату расстояния до ближайшего центроида.
4. Шаги 2 и 3 повторяются, пока не найдено ранее заданное количество центроидов.

После инициализации начальных кластерных центров метод k -средних++ продолжает работать как обычный метод k -средних, в котором точки данных приравниваются к ближайшим кластерам, а потом центроиды пересчитываются, процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнута сходимость.

В проекте кластеризация нужна для того, чтобы построить новые категории статей электронной энциклопедии, это позволит выявить ключевые особенности статей для лучшего понимания тематики электронной энциклопедии. Также это даёт возможность организовать индексированный поиск для быстрого доступа к информации о статьях в категориях.

Для более наглядного отображения использовался метод t-SNE.

Цель t-SNE – визуализация сложных многомерных данных в двух или трех измерениях, сохраняя локальные и глобальные сходства между объектами. Данный метод является нелинейным методом снижения размерности и широко используется для обнаружения скрытых структур и кластеров в данных.

Математическое описание t-SNE – имеется набор исходных точек $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, где каждая точка x_i принадлежит пространству высокой размерности.

Вычисление вероятности схожести p_{ij} между точками x_i и x_j в исходном пространстве

$$p_{ij} = \frac{p_{ji} + p_{ij}}{2n}, \quad (4)$$

где $p_{ij} = \exp\left(\frac{-\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma_i^2}\right)$, σ_i – ширина гауссовского ядра.

Вычисление вероятности схожести q_{ij} между соответствующими точками y_i и y_j в пространстве низкой размерности

$$q_{ij} = \frac{(1 + \|y_i - y_j\|^2)^{-1}}{\sum_{k \neq l} (1 + \|y_k - y_l\|^2)^{-1}}. \quad (5)$$

Минимизация дивергенции Кульбака-Лейблера между p_{ij} и q_{ij} при помощи градиентного спуска

$$y_i(\text{new}) = y_i(\text{old}) + \eta \sum_{j=1}^n (p_{ij} - q_{ij}) \cdot (1 + \|y_i - y_j\|^2)^{-1} \cdot (y_i - y_j), \quad (6)$$

где η – скорость обучения.

Результаты и их обсуждение

Результатом кластеризации методом k-средних++ является график, изображённый на рис. 1.

На графике ось Unique_percent отвечает за процент содержания уникальных триграмм в статье, где значения варьируются от 0-100. Ось Usual_percent отвечает за процент содержания в статье часто распространённых триграмм в статье, где значения варьируются от 0-100. На данном графике располагается 98 кластеров. Точность кластеризации определена метрикой силуэта и равна 96.6%, что указывает на хорошо разделённые кластеры.

Уникальность триграмм определяется на основе значений TF-IDF, представленных в табл. 3.

Смотря на график, нельзя однозначно выделить кластеры. Для решения данной проблемы был использован метод снижения размерности данных t-SNE, его результат представлен на рис. 2.

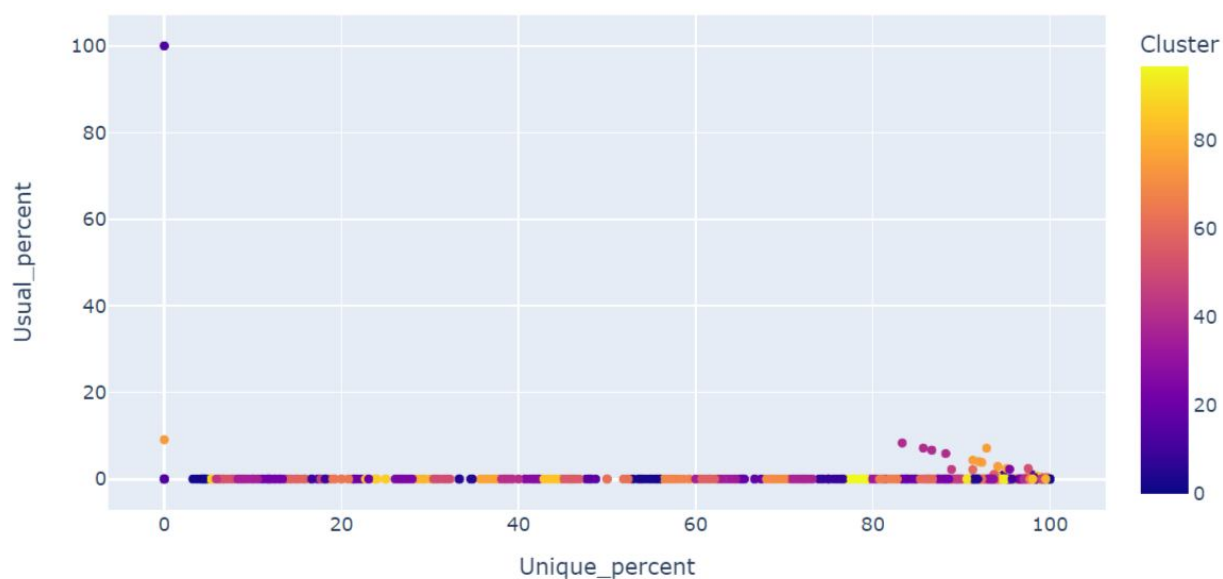


Рис. 1. Результирующий график кластеризации

Fig. 1. The resulting clustering graph

Таблица 3. Группы частотности

Table 3. Frequency groups

Наименование / Name	Расшифровка / Decryption	Диапазон / Range
unique	Уникальные триграммы	от 0.8 до 1
less unique	Менее уникальные триграммы	от 0.6 до 0.8
usually unique	Часто уникальные триграммы	от 0.4 до 0.6
less usual	Менее часто распространённые триграммы	от 0.2 до 0.4
usual	Часто распространённые триграммы	от 0 до 0.2

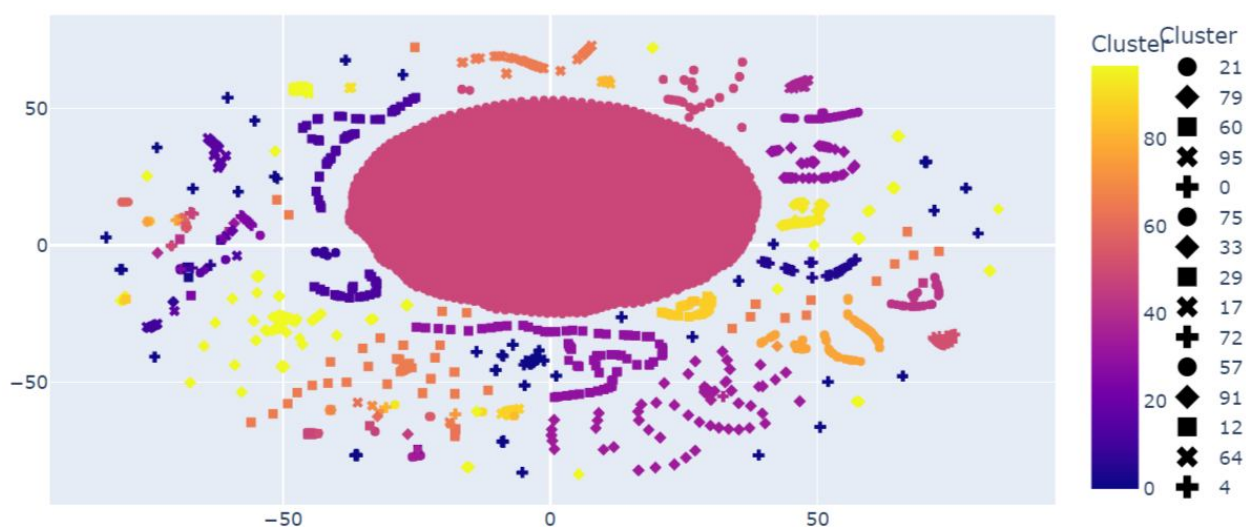


Рис. 2. Результирующий график кластеризации с применением t-SNE

Fig. 2. The resulting clustering graph using t-SNE

Из этого графика выделяется большая область розовых кластеров, они обозначают статьи, у которых сто процентов уникальных триграмм. Фиолетовым цветом обозначаются статьи, у которых большая часть содержания статьи составляют уникальные триграммы, меньшую часть – менее уникальные триграммы. Оранжевым цветом выделены статьи, в которых большая часть – уникальные триграммы, остальное – менее уникальные триграммы и обычно уникальные триграммы. Остальные кластера обозначают сочетания содержания статей уникальности триграмм, где всё равно большую часть составляют уникальные триграммы в сочетании с другими группами уникальности триграмм.

Выводы

В данной работе был проведен анализ текстовых статей с использованием методов обработки естественного языка. Применялась статистическая мера TF-IDF для оценки важности термов в документе относительно корпуса документов. Далее была выполнена кла-

стеризация методом k-средних++ для создания новых категорий статей на основе их содержания. Результаты кластеризации были визуализированы с помощью метода t-SNE, позволяющего отобразить сложные многомерные данные в двух измерениях.

Результирующий график кластеризации показал хорошо разделенные кластеры с высокой точностью, оцененной метрикой силуэта в 96.6%. Уникальность триграмм была определена на основе значений TF-IDF, и триграммы были классифицированы на различные группы уникальности.

Дополнительно, с применением метода t-SNE был получен график кластеризации, который помог визуально выделить новые категории статей. На графике были выявлены области, где статьи содержат высокую уникальность триграмм, а также комбинации различных групп уникальности.

В ходе данной работы была подготовлена модель для построения эргономичной системы помощника на основе данных открытой библиотеки электронной энциклопедии.

Список литературы

1. Ермаков П. Д., Федянин Р.В. Исследование методов машинного обучения в задаче автоматического определения тональности текстов на естественном языке // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2015. №. 18. С. 600-615.
2. Шокина М. О. Применение алгоритма k-means++ для кластеризации последовательностей с неизвестным количеством кластеров // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2017. №. 20. С. 160-163.

3. Крижановский А. А. Преобразование структуры словарной статьи Викисловаря в таблицы и отношения реляционной базы данных. URL: <http://scipeople.com/publication/1000231>.
4. Частикова В.А., Остапов Д.С. Применение методов кластеризации для повышения точности работы нейронных сетей // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1.
5. Соболева Е. Д., Попова И. А., Попова А. А. Визуализация многомерных наборов данных при помощи алгоритмов снижения пространства признаков рса и t-sne // StudNet. 2020. Т. 3. №. 11. С. 982-1004.
6. Прогнозирование живучести мультисервисной корпоративной сети связи / Ф.Ю. Лозбинев, А.С. Сазонова, А.А. Тищенко, Ю.А. Леонов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 4 (57). С. 144-150.
7. Методология и технология проектирования информационных систем / Ю.М. Казаков, А.А. Тищенко, А.А. Кузьменко, Ю.А. Леонов, Е.А. Леонов. М.: Общество с ограниченной ответственностью ФЛИНТА, 2018. 136 с.
8. Лагереv А.В., Сазонова А.С., Филиппов Р.А. Модель оценки социально-демографического потенциала и его влияние на структуру высшего профессионального и послевузовского образования в регионе // Информационные системы и технологии. 2012. № 3 (71). С. 72-77.
9. Поиск оптимальных технологических процессов с использованием алгоритмов эвристического поиска / Ю.А. Леонов, Е.А. Леонов, А.С. Зуева, А.С. Сазонова // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 4 (57). С. 122-127.
10. Модель размещения данных во внутренней памяти вычислителя, реализующего схему кодирования данных в режиме сцепления блоков / М.О. Таныгин, А.А. Ахмад, О.В. Казакова, Д.А. Голубов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(1): 73-91. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-73-91>.
11. Экономическая безопасность в региональных социально-экономических системах / Е.Э. Аверченкова, А.В. Аверченков, Ю.А. Леонов, Д.В. Кравцов, Л.Б. Филиппова, Е.А. Леонов. М.: Общество с ограниченной ответственностью "ФЛИНТА", 2019. 157 с.
12. Разработка математической модели информационной системы для инвентаризации и мониторинга программного и аппаратного обеспечения на основе методов нечеткой логики / Р.А. Филиппов, Р.А. Филиппов, Л.Б. Филиппова, А.В. Аверченков, А.С. Сазонова, С.А. Шептунов // Качество. Инновации. Образование. 2018. № 7 (158). С. 105-112.
13. Аверченков В.И., Спасенников В.В., Филиппов Р.А. Исследование точности позиционирования объектов при оптической микроскопии с управлением через Интернет // Вестник Брянского государственного технического университета. 2012. № 1 (33). С. 125-130.

14. Сазонова А.С., Филиппова Л.Б., Филиппов Р.А. Оценка инновационного потенциала региона // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2017. Т. 79. № 2 (72). С. 273-279.

15. Жадаев Д.С., Кузьменко А.А., Спасенников В.В. Особенности нейросетевого анализа уровня подготовки студентов в процессе адаптивного тестирования их профессиональных компетенций // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 2 (75). С. 90-98

16. Кондратенко С.В., Кузьменко А.А., Спасенников В.В. Методология оценки деятельности операторов в человеко-машинных системах // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 1 (54). С. 261-270.

17. KMeansTrainer Класс. URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/api/microsoft.ml.trainers.kmeanstrainer?view=ml-dotnet>, свободный.

18. Реализация агентно-базированных метакомпьютерных систем и приложений / Н.С. Карамышева, Д.С. Свищев, К.В. Попов, С.А. Зинкин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(1): 148-171. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-148-171>.

19. Милостная Н. А. Исследование устойчивости нейро-нечёткой системы вывода, основанной на методе отношения площадей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(3): 70-85. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-70-85>.

20. Мартышкин А. И., Кирюткин И. А., Мереняшева Е. А. Автотестирование встраиваемой реконфигурируемой вычислительной системы // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(1): 140-152. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-140-152>.

References

1. Ermakov P. D. Issledovanie metodov mashinnogo obucheniya v zadache avtomaticheskogo opredeleniya tonal'nosti tekstov na estestvennom yazyke [Research of machine learning methods in the problem of automatic determination of the tonality of texts in natural language]. *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh = New Information Technologies in Automated Systems*, 2015, no. 18, pp. 600-615.

2. Shokina M. O. Primenenie algoritma k-means++ dlya klasterizatsii posledovatel'nostei s neizvestnym kolichestvom klasterov [Application of the k-means++ algorithm for clustering sequences with an unknown number of clusters]. *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh = New Information Technologies in Automated Systems*, 2017, no. 2, pp. 160-163.

3. Krizhanovsky A. A. *Preobrazovanie struktury slovarnoi stat'i Vikislovary v tablitsy i otnosheniya relyatsionnoi bazy dannykh* [Transformation of the structure of a Wiktionary

dictionary entry into tables and relational database relationships], Available at: <http://scipeople.com/publication/1000231>.

4. Chastikova V.A., Ostapov D.S. Primenenie metodov klasterizatsii dlya povysheniya tochnosti raboty neironnykh sete [Application of clustering methods to improve the accuracy of neural networks]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, 2015, no. 1-1.

5. Soboleva E. D., Popova I. A., Popova A. A. Vizualizatsiya mnogomernykh naborov dannykh pri pomoshchi algoritmov snizheniya prostranstva priznakov pca i t-sne [Visualization of multidimensional data sets using algorithms for reducing the feature space of pca and t-sne]. *StudNet Publ.*, 2020, vol. 3, no. 11, pp. 982-1004.

6. Lozbinev F.Yu., Sazonova A.S., Tishchenko A.A., Leonov Yu.A. Prognozirovanie zhivuchesti mul'tiservisnoi korporativnoi seti svyazi [Forecasting the survivability of a multi-service corporate communication network]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 2017, no. 4 (57), pp. 144-150.

7. Kazakov Yu.M., Tishchenko A.A., Kuzmenko A.A., Leonov Yu.A., Leonov E.A. *Metodologiya i tekhnologiya proektirovaniya informatsionnykh sistem* [Methodology and technology of information systems design]. Moscow, FLINT Publ., 2018, 136 p.

8. Lagerev A.V., Sazonova A.S., Filippov R.A. Model' otsenki sotsial'no-demograficheskogo potentsiala i ego vliyanie na strukturu vysshego professional'nogo i poslevuzovskogo obrazovaniya v regione [A model for assessing socio-demographic potential and its impact on the structure of higher professional and postgraduate education in the region]. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii = Information Systems and Technologies*, 2012, no. 3 (71), pp. 72-77.

9. Leonov Yu.A., Leonov E.A., Zueva A.S., Sazonova A.S. Poisk optimal'nykh tekhnologicheskikh protsessov s ispol'zovaniem algoritmov evristicheskogo poiska [Search for optimal technological processes using heuristic search algorithms]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 2017, no. 4 (57), pp. 122-127.

10. Tanygin M. O., Ahmad A.A., Kazakova O. V., Golubov D. A. Recursive Algorithm for Forming Structured Sets of Information Blocks that Increase the Speed of Performing Procedures for Determining Their Source. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(1): 73-91 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-73-91>.

11. Averchenkova E.E., Averchenkov A.V., Leonov YU.A., Kravcov D.V., Filippova L.B., Leonov E.A. *Ekonomicheskaya bezopasnost' v regional'nyh sotsial'no-ekonomicheskikh sistemah* [Economic security in regional socio-economic systems]. Moscow, FLINTA Publ., 2019, 157 p.

12. Filippov R.A., Filippov R.A., Filippova L.B., Averchenkov A.V., Sazonova A.S., Sheptunov S.A. Razrabotka matematicheskoy modeli informacionnoy sistemy dlya inventarizatsii i monitoringa programmnoy i apparatnoy obespecheniya na osnove metodov nechetkoj logiki [Development of a mathematical model of an information system for inventorying and monitoring software and hardware based on fuzzy logic methods]. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie = Quality. Innovation. Education*, 2018, no. 7 (158), pp. 105-112.

13. Averchenkov V.I., Spasennikov V.V., Filippov R.A. Issledovanie tochnosti pozicionirovaniya ob"ektov pri opticheskoy mikroskopii s upravleniem cherez Internet [Investigation of the accuracy of object positioning in optical microscopy with control via an Internet]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 2012, no. 1 (33), pp. 125-130.

14. Sazonova A.S., Filippova L.B., Filippov R.A. Ocenka innovacionnogo potentsiala regiona [Assessment of the innovative potential of the region]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy = Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2017, vol. 79, no. 2 (72), pp. 273-279.

15. Zhadaev D.S., Kuz'menko A.A., Spasennikov V.V. Osobennosti nejrosetevogo analiza urovnya podgotovki studentov v processe adaptivnogo testirovaniya ih professional'nykh kompetentsiy [Features of neural network analysis of the level of training of students in the process of adaptive testing of their professional competencies]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 2019, no.2 (75), pp. 90-98.

16. Kondratenko S.V., Kuz'menko A.A., Spasennikov V.V. Metodologiya ocenki deyatel'nosti operatorov v cheloveko-mashinnykh sistemakh [Methodology for evaluating operator activity in human-machine systems]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 2017, no. 1 (54), pp. 261-270.

17. *KMeansTrainer Klass*. Available at: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/api/microsoft.ml.trainers.kmeanstrainer?view=ml-dotnet>, svobodnyj.

18. Karamysheva N. S., Svishchev D. S., Popov K. V., Zinkin S. A. Implementation of Agent-Based Metacomputersystems and Applications. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(1): 148-171 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-148-171>

19. 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>.

20. Martyshkin A. I., Kiryutkin I. A., Merenyasheva E. A. Autotesting an Embedded Reconfigurable Computing System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(1): 140-152 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-140-152>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Савенков Данила Сергеевич, студент,
Брянский государственный
технический университет,
г. Брянск, Российская Федерация,
e-mail: savenkov-lokin2013@yandex.ru

Danila S. Savenkov, Student, Bryansk State
Technical University, Bryansk, Russian Federation,
e-mail: savenkov-lokin2013@yandex.ru

Поздняков Семён Юрьевич, студент,
Брянский государственный
технический университет,
г. Брянск, Российская Федерация,
e-mail: santaspolusa@gmail.com

Semyon Yu. Pozdnyakov, Student, Bryansk State
Technical University, Bryansk, Russian Federation,
e-mail: santaspolusa@gmail.com

Кузьменко Александр Анатольевич,
кандидат биологических наук, доцент
кафедры «Компьютерные технологии
и системы», Брянский государственный
технический университет,
г. Брянск, Российская Федерация,
e-mail: alex-rf-32@yandex.ru

Alexander A. Kuzmenko, Cand. of Sci.
(Biological), Associate Professor of Computer
Technologies and Systems Department,
Bryansk State Technical University,
Bryansk, Russian Federation,
e-mail: alex-rf-32@yandex.ru

Филиппов Родион Алексеевич, кандидат
технических наук, доцент, доцент кафедры
«Компьютерные технологии и системы»,
Брянский государственный
технический университет,
г. Брянск, Российская Федерация,
e-mail: redfil@mail.ru

Rodion A. Filippov, Cand. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Associate Professor of
Computer Technologies and Systems Department,
Bryansk State Technical University,
Bryansk, Russian Federation,
e-mail: redfil@mail.ru

Филиппова Людмила Борисовна, кандидат
технических наук, доцент, доцент кафедры
«Компьютерные технологии и системы»,
Брянский государственный
технический университет,
г. Брянск, Российская Федерация,
e-mail: libv88@mail.ru

Lyudmila B. Filippova, Cand. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Associate Professor of
Computer Technologies and Systems Department,
Bryansk State Technical University,
Bryansk, Russian Federation,
e-mail: liv88@mail.ru

Математическая интерпретация результатов когнитивного анализа метаданных сетевых пакетов

М.О. Таныгин¹ ✉, В.П. Добрица¹, А.В. Митрофанов¹, Х.И. Ахмат¹

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

✉ e-mail: tanygin@yandex.com

Резюме

Цель исследования. В статье рассматривается возможность повышения вероятности корректной аутентификации удалённого источника сообщений на основе анализа метаданных формируемых им сетевых пакетов. При передаче данных по сетям с низким энергопотреблением величины межпакетных интервалов времени подчинены известным законам распределения. На основе данных законов и принципов формирования аутентичных сообщений определено, что ошибка аутентификации приводит к формированию в приёмнике двух последовательностей пакетов, отличающихся одним элементом, для которых невозможно однозначно определить ту, которая полностью состоит из пакетов источника. Анализ времени поступления пакетов данных в двух последовательностях позволяет выработать решающее правило, на основании которого из двух последовательностей определяется аутентичная.

Методы. Анализ метаданных проводится для последовательностей размером 5 – 20 пакетов данных, что делает информативным лишь моменты высоких порядков для выборок межпакетных интервалов времени для таких последовательностей. Используется карта коэффициентов асимметрий и эксцессов, анализ которой позволил сформулировать гипотезу о том, что решающее правило для определения аутентичной последовательности можно принять на основании минимума расстояния до параболы, являющейся картой распределения коэффициентов эксцессов и асимметрий для распределения Пуассона.

Результаты. На основе разработанной математической модели поступления данных в приёмник получены наборы данных для проверки сформулированного критерия выбора аутентичной последовательности. Анализ доли принятых верных решений по критерию минимальности расстояния и доли случаев, в которых решающее правило может быть применено, позволил сформулировать критерий применимости правила минимального расстояния до параболы на карте коэффициентов эксцесса и асимметрии, который заключается в том, что правило применяется, если минимум расстояния для одной последовательности в 3 – 4 раза меньше, чем минимум для второй последовательности пары.

Заключение. В работе показано, что использование критерия кратного превышения минимального расстояния до карты распределения коэффициентов эксцесса и асимметрии позволяет повысить достоверность определения аутентичных последовательностей длиной 5 – 20 пакетов данных для распределения Пуассона, позволяет повысить точность принятия правильного решения до 90-95% при возможности использования метода в 60% – 80% случаев.

Ключевые слова: обработка данных; аутентификация; карта распределений; коэффициент эксцесса; коэффициент асимметрии; имитационное моделирование.

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

Для цитирования: Математическая интерпретация результатов когнитивного анализа метаданных сетевых пакетов / М.О. Таныгин, В.П. Добрица, А.В. Митрофанов, Х.И. Ахмат // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(3): 66-78. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-66-78>.

Поступила в редакцию 02.09.2023

Подписана в печать 27.09.2023

Опубликована 28.10.2023

Mathematical Interpretation of the Results of Cognitive Analysis of Network Packet Metadata

Maxim O. Tanygin ¹ ✉, Vyacheslav P. Dobritsa ¹, Aleksey V. Mitrofanov ¹,
Khaua I. Ahmat ¹

¹ Southwest State University

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

✉ e-mail: tanygin@yandex.com

Abstract

Purpose of research. The article discusses the possibility of increasing the probability of correct authentication of a remote message source based on the analysis of metadata of network packets generated by it. When transmitting data over networks with low power consumption, the values of inter-packet time intervals are subject to known distribution laws. Based on these laws and principles for the formation of authentic messages, it has been determined that an authentication error leads to the formation in the receiver of two sequences of packets that differ in one element, for which it is impossible to unambiguously determine the one that consists entirely of source packets. Analysis of the arrival time of data packets in two sequences allows us to develop a decision rule, on the basis of which the authentic one is determined from the two sequences.

Methods. Metadata analysis is carried out for sequences of 5–20 data packets in size, which makes only high-order moments for samples of inter-packet time intervals for such sequences informative. A map of coefficients of asymmetries and kurtosis is used, the analysis of which allowed us to formulate the hypothesis that the decisive rule for determining the authentic sequence can be adopted based on the minimum distance to the parabola, which is a map of the distribution of coefficients of kurtosis and asymmetries for the Poisson distribution.

Results. Based on the developed mathematical model of data arrival at the receiver, data sets were obtained to test the formulated criterion for selecting an authentic sequence. Analysis of the proportion of correct decisions made according to the minimum distance criterion and the proportion of cases in which the decision rule can be applied allowed us to formulate a criterion for the applicability of the rule of the minimum distance to a parabola on the map of kurtosis and asymmetry coefficients, which consists in the fact that the rule is applied if the minimum distance for one sequences are 3 – 4 times less than the minimum for the second sequence of the pair.

Conclusion. The work shows that using the criterion of multiple excess of the minimum distance to the map of distribution of kurtosis and skewness coefficients makes it possible to increase the reliability of determining authentic sequences with a length of 5–20 data packets for the Poisson distribution, and makes it possible to increase the accuracy of making the right decision to 90-95% with the possibility of using the method in 60% – 80% of cases.

Keywords: data processing; authentication; distribution map; kurtosis coefficient; skewness coefficient; simulation modeling.

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

For citation: Tanygin M.O., Dobritsa V.P., Mitrofanov A.V., Ahmat Kh.I. Mathematical Interpretation of the Results of Cognitive Analysis of Network Packet Metadata. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(3): 66-78 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2023-27-3-66-78](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-66-78).

Received 02.09.2023

Accepted 27.09.2023

Published 28.10.2023

Введение

Традиционным средством выполнения аутентификации источников сетевых пакетов является введение в заголовки пакетов кодов аутентификации сообщений или имитовставок. Отправитель формирует пакет данных и на основе его содержимого формирует и имитовставку. Приёмник проводит анализ полученного пакета и его имитовставки, определяя, является ли отправитель носителем некоторого секретного для третьей стороны идентификатора сеанса обмена данными (пароля). В общем случае вероятность преодоления имитозащиты, навязывания ложных данных или ошибки первого рода при проведении процедуры аутентификации определяется разрядностью кода аутентификации. Если же актуален вопрос сокращения передаваемого объёма данных (для протоколов промышленного интернета, протоколов дальней радиосвязи с низкой пропускной способностью, протоколов интернета вещей), тогда ограниченность размеров имитовставки в ряде случаев не позволяет обеспечить требуемую вероятность такой ошибки [1-4]. Это вынуждает использовать для алгоритмы установления подлинности, основанные на кодировании в режиме сцепления блоков,

которые при равном размере имитовставки дают меньшую вероятность ошибки, но отличаются более высокой вычислительной сложностью [5-8]. Для ряда систем и протоколов связи остро встаёт необходимость сокращения размера заготовки из-за ограниченности размеров передаваемого кадра данных. Другим направлением повышения достоверности процедуры аутентификации является использование метаинформации, то есть информации, которую приёмник может извлечь из самого факта получения пакета или нескольких пакетов. Это может быть размер дополнительной информации, передаваемой по альтернативному каналу связи [9], статистических характеристик сигнала в канале связи [10], время поступления пакетов данных в приёмник [11], пространственное расположение источников пакетов данных [12].

Наиболее перспективным представляется анализ времени поступления пакетов данных в приёмник, так как каждый протокол передачи информации обладает собственными характеристиками распределения частоты межпакетных интервалов, что в сочетании с методами контроля аутентичности позволяет сформировать решающие правила для выделения аутентичных пакетов данных в случаях, когда анализ кодов

аутентификации сообщений не позволяют этого сделать. При этом анализироваться должны не только непосредственно значения межпакетных интервалов как значения случайной величины с некоторым законом распределения, а значения моментов данной случайной величины как наиболее информативные [13].

Материалы и методы

В рассмотренном методе анализа моментов высоких порядков для небольших по размеру выборок межпакетных интервалов времени [11] использовался подход, описанный в работе [14], при котором значения коэффициентов асимметрии и эксцесса для каждой выборки размещались на координатной плоскости, а затем производился их анализ, исходя из выявленных зависимостей между указанными параметрами. При моделировании передачи данных в LoRaWAN-сетях использовалась модель, описанная в [15, 16], которая модифицировалась с учётом использования для аутентификации кодирования в режиме сцепления блоков [17]. В результате последовательности сообщений, передаваемые от источника в приёмник, позволяют использовать дополнительную метainформацию для повышения достоверности аутентификации – интервалы времени моментами получения сообщений последовательности. Для выборок, формируемых такими временными интервалами, рассматривались коэффициенты асиммет-

рии и эксцесса [18]. При анализе отличий законов распределения малых выборок, которые из себя представляют величины межпакетных интервалов при поступлении пакетов в приёмник, наиболее информативным являются моменты высоких порядков, которые, в отличие от моментов низких порядков, чувствительны в небольшом отклонениям в законах распределения элементов выборок [19]. При этом, в случае возникновения ошибки аутентификации, значения времени поступления пакета, вызвавшего коллизию кодов аутентификации сообщений, изменяет значения двух интервалов времени в выборке, соответствующей последовательности аутентичных сообщений. Таким образом формируются отличия в карте коэффициентов асимметрии и эксцесса для множества выборок, образованных интервалами между временем поступления аутентичных пакетов данных (рис. 1 а) и множества выборок, образованных межпакетными интервалами для последовательностей, содержащих пакет постороннего источника (рис. 1 б).

Визуальный анализ карт коэффициентов асимметрии и эксцесса позволяет сделать вывод, что указанные параметры лежат в окрестности некоторой параболы. Данное наблюдение согласуется с исходными данными для составления модели поступления пакетов данных в приёмник: в её основе лежит предположение о том, что передача данных источником есть случайное событие, не зависящее от предыстории [16], что делает

распределение межпакетных интервалов времени подчинённым распределению Пуассона [20]. Распределение же Пуас-

сона характеризуется квадратичной зависимостью между коэффициентами эксцесса E и асимметрии A : $E = A^2$.

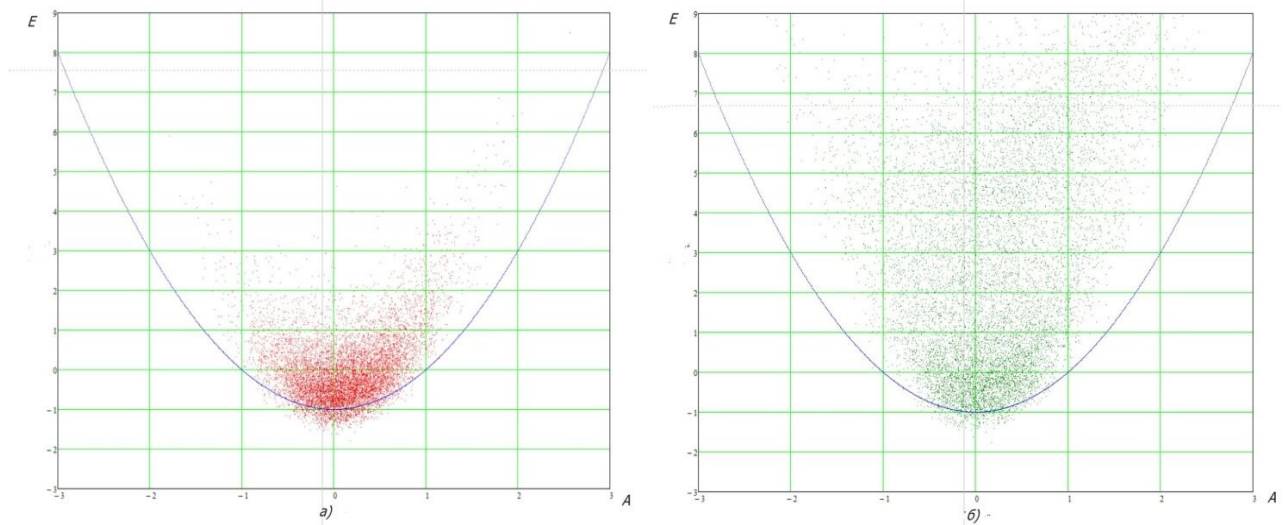


Рис. 1. Карта коэффициентов эксцесса и асимметрии для множества выборок, образованных интервалами между временем поступления пакетов данных: **а** – для множества аутентичных пакетов данных; **б** – для множества последовательностей, содержащих пакет постороннего источника

Fig. 1. Map of kurtosis and skewness coefficients for a set of samples formed by intervals between the arrival times of data packets: **a** – for many authentic data packets; **b** – for a set of sequences containing a packet from an extraneous source

Исследования показали, что замена в последовательности аутентифицированных сообщений одного сообщения на постороннее изменяет два элемента выборки величины межпакетных интервалов времени, делая распределение этих величин более похожим на равномерное. Это приводит к увеличению коэффициента эксцесса и незначительному изменению абсолютного значения коэффициента асимметрии [18].

Соответственно, когнитивный анализ карты распределений коэффициентов эксцесса и асимметрии и контекст формирования такой карты позволяет сформулировать гипотезу настоящего исследования: критерием для принятия

решения об аутентичности последовательности сообщений может быть минимальность расстояния до некоторой параболы, построенной в той же системе координат.

Математическое описание сформулированной гипотезы выглядит следующим образом. Имеем параболу $E = f(A) = A^2 - A_0$ и точку v с координатами (A^v, E^v) , необходимо найти минимальное расстояние от параболы до точки. Пусть это длина отрезка $v - w$, где w – точка параболы с координатами (A^w, E^w) . Квадрат длины отрезка $v - w$ равен

$$(E^w - E^v)^2 + (A^w - A^v)^2 = \left((A^w)^2 - 1 - E^w \right)^2 + (A^w - A^v)^2. \quad (1)$$

Продифференцировав выражение по A^w и приравняв к нулю, получим кубическое уравнение вида:

$$(A^w)^3 + A^w \left(-\frac{3}{2} - E^w \right) + \frac{1}{2} A^v = 0, \quad (2)$$

которое имеет 1 действительный корень (существует только одна точка на минимальном удалении от параболы при исключении из рассмотрения точек, лежащих на оси симметрии). Решая его, находим метрику D для пары коэффициентов (A^w, E^w) :

$$D(A^w, E^w) = (Q - A^w)^2 + (Q^2 - 1 - W^w)^2, \\ Q = \left(\frac{1}{4} A^w + \left(\left(-\frac{3}{2} - E^w \right)^3 + \frac{1}{4} (A^w)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{3}} + \\ + \left(\frac{1}{4} A^w - \left(\left(-\frac{3}{2} - E^w \right)^3 + \frac{1}{4} (A^w)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (3)$$

Соответственно, аутентичной последовательностью из двух, сформированной целевым источником, будем считать ту, для которой метрика $D(A^w, E^w)$ будет минимальна.

Результаты и их обсуждение

Сформулированный критерий был проверен на тестовых наборах для различных размеров выборок M . Каждый набор состоял из 10 тысяч сгенерированных на основе описанной в [17, 18] модели передачи данных по беспроводной сенсорной сети при использовании

кодирования в режиме сцепления блоков. Результат показал корректность принятия решения от 80% до 85% при 100%-м охвате критерием всех выборок. Это определило направление дальнейшего исследования – увеличение достоверности принятия решений при сокращении доли случаев, когда такой более строгий критерий может быть применён. Так как ошибка возникает, когда расстояние от параболы для последовательности, содержащей посторонние сообщения меньше, чем аутентичной последовательности, то средством уменьшения такой ошибки является введение мультиплицирующего коэффициента n для меньшего расстояния от точки до параболы. То есть условие применимости правила для пары точек (A_1, E_1) и (A_2, E_2) запишется в виде:

$$D(A_1, E_1) > n \cdot D(A_2, E_2) \vee \\ \vee D(A_2, E_2) > n \cdot D(A_1, E_1). \quad (4)$$

При этом аутентичной последовательностью, будет признаваться та, чья точка на карте коэффициентов эксцесса и асимметрии будет минимальна. Доля правильно опознанных последовательностей P целевого источника в зависимости от длины последовательности M приведена на рис. 2.

Доля R последовательностей, которые удовлетворяли критерию (4) для различных значений размера выборки M и коэффициента n приведена на рис. 3.

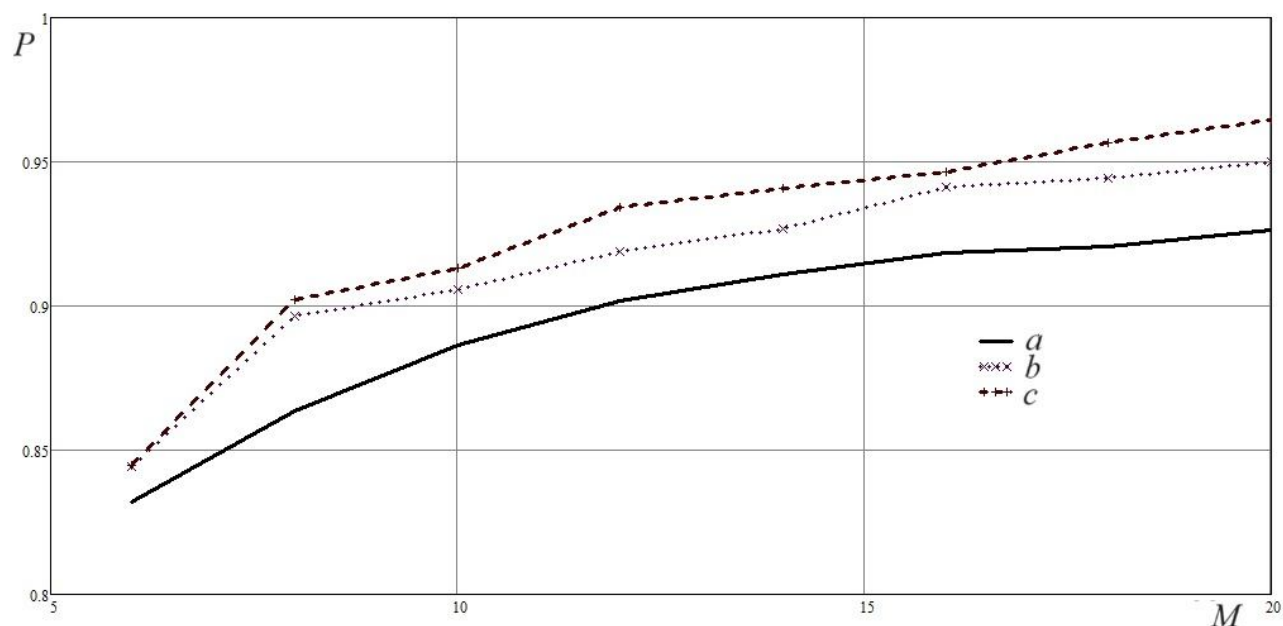


Рис. 2. График зависимости вероятности P правильного определения последовательностей целевого источника от длины последовательности M и значения коэффициента n :
a – $n = 2$; **b** – $n = 3$; **c** – $n = 4$

Fig. 2. Graph of the dependence of the probability P of correct identification of target source sequences on the sequence length M and the value of the coefficient n :
a – $n = 2$; **b** – $n = 3$; **c** – $n = 4$

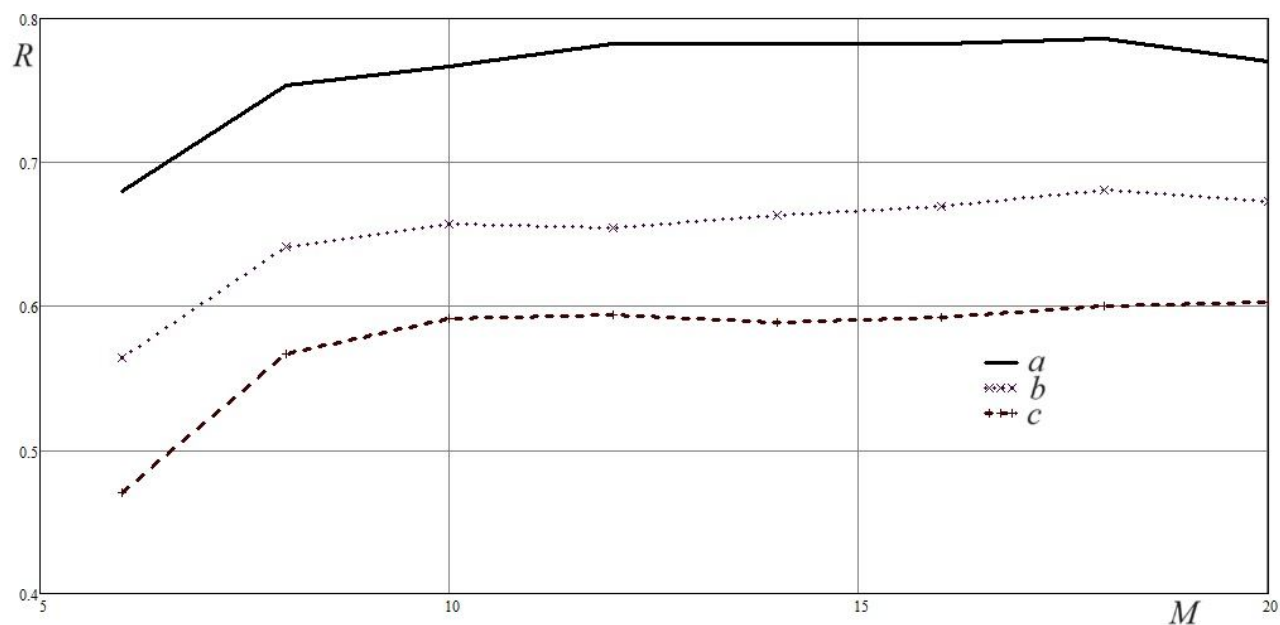


Рис. 3. Доля R последовательностей, которые удовлетворяют модифицированному критерию близости к параболе на карте эксцессов и асимметрий в зависимости от длины последовательности M и значения коэффициента n : **a** – $n = 2$; **b** – $n = 3$; **c** – $n = 4$

Fig. 3. The share R of sequences that satisfy the modified criterion of proximity to a parabola on the map of kurtosis and asymmetries depending on the sequence length M and the value of the coefficient n : **a** – $n = 2$; **b** – $n = 3$; **c** – $n = 4$

Из анализа графиков видно, что для определения аутентичной последовательности целесообразно выбирать коэффициент n в уточнённом критерии (4) из диапазона 2...3, так как меньший коэффициент не обеспечивает достоверности выше 90%, а увеличение коэффициента не ведёт к дальнейшему росту достоверности принятых решений, а лишь уменьшает долю случаев, когда решающее правило может быть применено.

Если сравнивать рассматриваемый метод в сравнении с рассмотренными ранее методами анализа коэффициентов эксцесса и асимметрии (табл. 1), то можно сделать вывод, что использование математической интерпретации сформулированной когнитивной гипотезы позволяет повысить достоверность принятия решений и долю случаев, когда метод анализа карт коэффициентов эксцесса и асимметрии может быть применён.

Таблица 1. Сравнение характеристик методов обработки коэффициентов эксцесса и асимметрии

Table 1. Comparison of characteristics of methods for processing kurtosis and skewness coefficients

Метод обработки данных / Data processing method	Процент верных принятия решений / Percentage of correct decisions	Доля случаев, когда метод мо- жет быть применён / Proportion of cases when the method can be applied
Сравнение абсолютных значений [18]	80%...90%	30%...40%
Сравнения абсолютных значений для множества выборок	85%...90%	60%...80%
Расстояние до параболы	90%...95%	60%...80%

Выводы

Выполненная в настоящей работе проверка гипотезы о возможности использования геометрического метода обработки коэффициентов эксцесса и асимметрии для выборок, содержащих значения межпакетных интервалов для последовательности аутентичных пакетов данных целевого источника, и для последовательности, содержащей один

пакет от постороннего источника. В результате имитационного моделирования определены целесообразные параметры критерия принятия решения об аутентичной последовательности данных.

Таким образом, описанный подход, отличаясь простотой реализации (в нём требуется только вычисление метрики последовательности по формуле (3)), позволяет повысить достоверность аутентификации до 90%...95% в 60%...80% случаев

коллизий кодов аутентификации сообщений. В случае, если разрядность кода аутентификации сообщения обеспечивает достоверность аутентификации на уровне определённых известными стандартами беспроводной связи для целевого класса информационных систем в 10% [21, 22], то это означает снижение доли ошибочно выполненных процедур аутентификации с означенных 10% [23]

до диапазона 4%...5%, то есть практически вдвое.

Направлениями дальнейших исследований может быть выбрано адаптация формы кривой, расстояние до которой находится по карте коэффициентов эксцесса и асимметрии к наблюдаемым значениям коэффициентов эксцесса и асимметрии для выборок, содержащих межпакетные интервалы времени.

Список литературы

1. Semtech Corporation. LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview. URL: https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf.
2. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks // IEEE Std 802.15.4-2020, pp.1-800, 23 July 2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9144691
3. Петров Д. Стандарты беспроводной связи диапазона ISM // Электронные компоненты. 2010. № 10. С. 28-32.
4. IEEE P802.11ahTM Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 2: Sub 1 GHz License Exempt Operation, 2017.
5. Stallings W. NIST Block Cipher Modes of Operation for Authentication and Combined Confidentiality and // Cryptologia. 2010. № 34. P. 225 – 235. doi: 10.1080/01611191003598295.
6. Iwata T., Kurosawa K. OMAC: one-key CBC MAC / // Fast Software Encryption, 10th International Workshop. 2003. P. 129 – 153. doi 10.1007/978-3-540-39887-5_11.
7. Dworkin M. SP 800-38D: Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: Galois/Counter Mode (GCM) and GMAC / Computer Security Division Information Technology Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899-8930, 2007.
8. Ifzarne S., Imad H., Idrissi N. Homomorphic Encryption for Compressed Sensing in Wireless Sensor Networks // SCA '18, October 10–11, 2018, Tetouan, Morocco DOI 10.1145/3286606.3286857
9. Никешин А.В., Шнитман В.З. Обзор расширяемого протокола аутентификации и его методов // Труды ИСП РАН, т. 30, вып. 2, 2018, с. 113-148. DOI: 10.15514/ISPRAS-2018-30(2)-7

10. Лэндби С. А., Разумов Л., Бао Ганг. Патент 2422998 Российская Федерация Н04В 7/216. Способ и устройство для высокоскоростной передачи пакетных данных и передачи данных с малой задержкой; заявл. 17.07.2006, опубл. 27.06.2011
11. Плугатарев А. В. Модель определения источника сообщений на основе статистического анализа метаданных в открытом канале связи // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2022. № 4(60). С. 30-37. DOI 10.54398/20741707_2022_4_30
12. Воробьев А. В. Концепция информационного пакетного взаимодействия в многоуровневой системе цифровых двойников // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2021. Т. 21, вып. 4. С. 532–543. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2021-21-4-532-543>
13. Уразбахтин А.И., Уразбахтин И.Г. Алгоритм проверки однородности выборки и ее репрезентативности исследуемому случайному процессу // Инфокоммуникационные технологии. 2006. Т. 4. № 3. С. 10-14.
14. Жукова Г.Н. Карта коэффициентов асимметрии и эксцесса в преподавании теории вероятностей и математической статистики // Концепт: научно-методический электронный журнал. 2015. № 8. С. 56-60.
15. Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey, Krotov Alexander, Guschin Andrey. A survey on IEEE 802.11 ah: An enabling networking technology for smart cities // Computer Communications. 2015. Vol. 58. Pp. 53–69. DOI:10.1016/j.comcom.2014.08.008.
16. Khorov Evgeny, Krotov Alexander, Lyakhov Andrey. Modelling Machine Type Communication in IEEE 802.11ah Networks // Communication Workshop (ICCW), 2015 IEEE International Conference on / IEEE. 2015. Pp. 1149–1154. DOI: 10.1109/ICCW.2015.7247332
17. Plugatarev A. V., Tanygin M. O. Model for Determining the Message Source by Analyzing Their Arrival Time // 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2022, pp. 388-392, doi: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896326.
18. Метод определения источника сообщений на основе обработки времени их поступления / М. О. Таныгин, А. В. Плугатарев, С. И. Егоров, А. П. Локтионов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(3): 81-97. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-81-97>.
19. Захаров И.С., Уразбахтин А.И. Метод обнаружения и исключения аномальных значений выборки, полученной из однородной генеральной совокупности // Телекоммуникации. 2007. № 7. С. 14-23.
20. Жукова Г.Н. Идентификация вероятностного распределения по коэффициентам асимметрии и эксцесса // Автоматизация. Современные технологии. 2016. №5. С. 26-33.
21. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks // IEEE Std 802.15.4-2020, pp.1-800, 23 July 2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9144691
22. Петров Д. Стандарты беспроводной связи диапазона ISM // Электронные компоненты. 2010. № 10. С. 28-32.

23. Таныгин М.О. Восстановление порядка следования информационных пакетов на основе анализа хеш-последовательностей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 175-188. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-175-188>.

References

1. Semtech Corporation. LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview. Available at: https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf.
2. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. *IEEE Std 802.15.4-2020*, pp.1-800, 23 July 2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9144691
3. Petrov D. Standarty besprovodnoi svyazi diapazona ISM [Wireless communication standards of the ISM range]. *Elektronnye komponenty = Electronic Components*, 2010, no. 10, pp. 28-32.
4. IEEE P802.11ahTM Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 2: Sub 1 GHz License Exempt Operation, 2017.
5. Stallings W. NIST Block Cipher Modes of Operation for Authentication and Combined Confidentiality and Cryptologia. 2010, no. 34, pp. 225 - 235. doi: 10.1080/01611191003598295.
6. Iwata T., Kurosawa K. OMAC: one-key CBC MAC. *Fast Software Encryption, 10th International Workshop*, 2003, pp. 129 – 153. doi 10.1007/978-3-540-39887-5_11.
7. Dworkin M. SP 800-38D: Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: Galois/Counter Mode (GCM) and GMAC. Computer Security Division Information Technology Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899-8930, 2007.
8. Ifzarne S., Imad H., Idrissi N. Homomorphic Encryption for Compressed Sensing in Wireless Sensor Networks. *SCA '18*, October 10–11, 2018, Tetouan, Morocco DOI 10.1145/3286606.3286857
9. Nikeshein A.V., Shnitman V.Z. Obzor rasshiraemogo protokola autentifika-tsii i ego metodov [Overview of the Extensible Authentication Protocol and its methods]. *Trudy ISP RAN = Proceedings of ISP RAS*, 2018, vol. 30, is. 2, pp. 113-148. DOI: 10.15514/ISPRAS-2018-30(2)-7.
10. Landby S.A., Razumov L., Bao Gang Patent 2422998 Russian Federation H04B 7/216. Sposob i ustroystvo dlya vysokoskorostnoi peredachi paketnykh dan-nykh i peredachi dannykh s maloi zaderzhkoi [Method and device for high-speed packet data transmission and low-latency data transmission]; application 07/17/2006, published 06/27/2011

11. Plugatarev A. V. Model' opredeleniya istochnika soobshchenii na osnove statisticheskogo analiza metadannykh v otkrytom kanale svyazi [Model for determining the source of messages based on statistical analysis of metadata in an open communication channel]. *Pri-kaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2022, no. 4(60), pp. 30-37. DOI 10.54398/20741707_2022_4_30
12. Vorobyov A. V. Kontseptsiya informatsionnogo paketnogo vzaimodeistviya v mnogourovnevoi sisteme tsifrovyykh dvoynikov [Concept of information packet interaction in a multi-level system of digital twins]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika = News of Saratov University. New Episode. Series: Mathematics. Mechanics. Computer Science*, 2021. T. 21, is. 4. pp. 532–543. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2021-21-4-532-543>
13. Urazbakhtin A.I., Urazbakhtin I.G. Algoritm proverki odnorodnosti vyborki i ee reprezentativnosti issleduemomu sluchainomu protsessu [Algorithm for checking the homogeneity of the sample and its representativeness of the random process under study]. *Infokommunikatsionnye tekhnologii = Infocommunication Technologies*, 2006, vol. 4, no. 3, pp. 10-14
14. Zhukova G.N. Karta koeffitsientov asimmetrii i ekstessa v prepodavanii teorii veroyatnostei i matematicheskoi statistiki [Map of skewness and kurtosis coefficients in teaching probability theory and mathematical statistics]. *Kontsept. Nauchno-metodicheskii elek-tronnyi zhurnal = Concept. Scientific and methodological electronic journal*. 2015, no. 8, pp. 56-60.
15. Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey, Krotov Alexander, Guschin Andrey. A survey on IEEE 802.11 ah: An enabling networking technology for smart cities. *Computer Communications*, 2015, vol. 58, pp. 53–69. DOI:10.1016/j.comcom.2014.08.008.
16. Khorov Evgeny, Krotov Alexander, Lyakhov Andrey. Modeling Machine Type Communication in IEEE 802.11ah Networks. *Communication Workshop (ICCW)*, 2015 *IEEE International Conference on IEEE*. 2015. pp. 1149–1154. DOI: 10.1109/ICCW.2015.7247332
17. Plugatarev A. V. Tanygin M. O., “Model for Determining the Message Source by Analyzing Their Arrival Time”. *2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2022, pp. 388-392, doi: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896326.
18. Politov E. N., Rukavitsyn A. N., Lomas Arciniega W. P., Terán Acosta G. R., Ávalos Cascante F. E., Puebla Puebla R. E. Method of Determining the Source of Messages Based on Processing the Time of Their Receipt. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(3): 81-97 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-81-97>
19. Zakharov I.S., Urazbakhtin A.I. Metod obnapuzheniya i isklyucheniya anomal'nykh znachenii vyborki, poluchennoi iz odnopolodnoi genepal'noi sovokupnosti [Method for detecting and excluding anomalous values in a sample obtained from a homogeneous population]. *Telekommunikatsii = Telecommunications*, 2007, no. 7, pp. 14-23.

20. Zhukova G.N. Identifikatsiya raspredeleniya po koeffitsientam asimmetrii i ekstsessa [Identification of distribution by skewness and kurtosis coefficients]. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii = Automation. Modern Technologies*, 2016, no.5, pp. 26-33.
21. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. *IEEE Std 802.15.4-2020*, pp.1-800, 23 July 2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9144691
22. Petrov D. Standarty besprovodnoi svyazi diapazona ISM [Wireless communication standards of the ISM range]. *Elektronnye komponenty = Electronic Components*, 2010, no. 10, pp. 28-32.
23. Tanygin M. O. Restoring the Order of Information Packets Based on Hash Sequence Analysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 175-188 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-175-188>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Таныгин Максим Олегович, доктор технических наук, доцент, декан факультета фундаментальной и прикладной информатики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tanygin@yandex.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4099-1414>

Maxim O. Tanygin, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Dean of Fundamental and Applied Informatics Faculty, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: tanygin@yandex.ru,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4099-1414>

Добрица Вячеслав Порфирьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Информационная безопасность», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dobritsa@mail.ru,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7533-3684>

Vyacheslav P. Dobritsa, Dr. of Sci. (Physical and Mathematical), Professor of Information Security Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dobritsa@mail.ru,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7533-3684>

Митрофанов Алексей Васильевич, аспирант кафедры «Информационная безопасность», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mitro3000@rambler.ru,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7200-6418>

Aleksey V. Mitrofanov, Post-Graduate Student of Information Security Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mitro3000@rambler.ru,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7200-6418>

Хауа Ибрахим Ахмат, аспирант кафедры «Информационная безопасность», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ib-swsu@yandex.ru

Khaua I. Ahmat, Post-Graduate Student of Information Security Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ib-swsu@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-79-96>

Метод динамического формирования изображений HUD дисплея для наземных автономных робототехнических средств

М.И. Заикин ¹ ✉, М.А. Летенков ¹, К.В. Камынин ¹, М.А. Астапова ¹

¹ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН)
14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: zmaik@live.com

Резюме

Цель исследования. Визуализация информации на Head-up дисплей (HUD) уже давно является неотъемлемой частью авиационной сферы, а также активно развивается в автомобильной. Такой дополнительный источник информации позволяет пилоту, водителю или другим типам пользователей быть сконцентрированным на окружающей обстановке, при этом получая важную в текущий момент времени дополнительную информацию. Однако использование HUD для робототехнических систем пока еще не получило должного развития.

Методы. В данной статье представлен метод, который обеспечивает динамическое формирование элементов дисплея в зависимости от текущего состояния, в котором функционирует роботизированное средство. Представленный метод универсален и обеспечивает вывод информации, которая является актуальной для текущего процесса функционирования.

Результаты. Для апробации разработанного метода было проведено внедрение программного обеспечения (ПО), динамически формирующего элементы Head-up дисплея в ПО для учебной наземной робототехнической платформы. Были разработаны и протестированы сценарии функционирования платформы с различным набором датчиков и динамически формируемыми вариантами представления дисплея. Результаты апробации разработанного решения на контрольной группе из 32 человек, и сравнительный анализ с дисплеем без динамического формирования элементов показал, что 87,5% испытуемых воспринимают информацию значительно лучше.

Заключение. В данной статье проведен анализ применимости Head-up дисплеев в сферах авиации и автомобильной техники. На базе полученных данных была составлена классификация выводимой на HUD информации. Апробация разработанного метода показала, что 28 из 32 человек предпочли использовать динамически формируемые HUD, что показывает перспективность дальнейшего развития данного решения.

Ключевые слова: наземная робототехника; HUD; формирование изображений; автономное робототехническое средство; оптимизационная задача; State Machine; динамическое формирование HUD.

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

Для цитирования: Метод динамического формирования изображений HUD дисплея для наземных автономных робототехнических средств / М.И. Заикин, М.А. Летенков, К.В. Камынин, М.А. Астапова // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(3): 79-96. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-79-96>.

Поступила в редакцию 12.09.2023

Подписана в печать 30.09.2023

Опубликована 28.10.2023

© Заикин М.И., Летенков М.А., Камынин К.В., Астапова М.А., 2023

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2023; 27(3): 79-96

Dynamic HUD Imaging Method for Ground Autonomous Robotics

Mikhail I. Zaikin ¹ ✉, Maksim A. Letenkov ¹, Konstantin V. Kamynin ¹,
Marina A. Astapova ¹

¹ St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS)
39, 14th Line, St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: zmaik@live.com

Abstract

Purpose of research. Visualization of information on a Head-up Display (HUD) has long been an integral part of the aviation industry, and is also actively developing in the automotive industry. This additional source of information allows the pilot, driver or other types of users to be focused on the surrounding environment, while receiving additional information that is important at the current time. However, the use of HUDs for robotic systems has not yet been fully developed.

Methods. This article presents a method that provides dynamic formation of display elements depending on the current state in which the robotic device operates. The presented method is universal and provides the output of information that is relevant to the current operating process.

Results. To approbation the developed method, software was introduced that dynamically forms head-up display elements in software for a training ground robotic platform. Scenarios for the functioning of the platform with a different set of sensors and dynamically generated display presentation options were developed and tested. The results of testing the developed solution on a control group of 32 people and a comparative analysis with a display without dynamic formation of elements showed that 87.5% of subjects perceive information much better.

Conclusion. This article analyzes the applicability of Head-up displays in the fields of aviation and automotive technology. Based on the data obtained, a classification of information displayed on the HUD was compiled. Testing of the developed method showed that 28 out of 32 people preferred to use dynamically generated HUDs, which shows the promise of further development of this solution.

Keywords: Ground Robotics, HUD, Image Formation, Autonomous Robotics, Optimization Task, State Machine, Dynamic HUD Formation.

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

For citation: Zaikin M. I., Letenkov M. A., Kamynin K. V., Astapova M. A. Dynamic HUD Imaging Method for Ground Autonomous Robotics. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(3): 79-96 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-79-96>.

Received 12.09.2023

Accepted 30.09.2023

Published 28.10.2023

Введение

В настоящее время робототехнические средства находят применение в самых различных сферах, начиная с

промышленности и заканчивая сферой услуг. Одним из распространенных типов робототехнических средств, ис-

пользуемых на практике, является наземное мобильное робототехническое средство – Autonomous Ground Vehicle (AVG). Как правило, при работе с наземным мобильным роботом используется человеко-машинный интерфейс. Однако зачастую видеопоток с робота и данные с сенсоров расположены в разных частях пользовательского интерфейса и для снятия показаний с датчиков оператору необходимо переключаться между частями интерфейса. Для работы с наземным роботом необходимо оптимизировать пользовательский интерфейс и разработать компактное представление разнородных данных в едином пространстве с наложением визуальных данных на видеопоток. Для такой задачи подходит технология Head-up дисплея, который в настоящее время находит применение на наземных и воздушных средствах передвижения как дисплей дополненной реальности [1, 2].

Head-up дисплей предназначен для визуализации показаний с сенсоров и датчиков в режиме реального времени. Данная технология широко распространена в авиационной, военной, а также в гражданской сферах, например, в автомобилях. Изначально Head-up дисплеи получили распространение в военной авиационной сфере. В частности, они использовались для более эффективного отслеживания параметров полета пилотом [3, 4], а в последствии заняли свое место и в гражданской авиации [5], став неотъемлемой частью авиаиндустрии. Такие дополняющие дисплеи

помогают при работе с информацией, при этом не нарушая фокусировку на конкретной текущей задаче. В дальнейшем Head-up дисплеи получили свое распространение и в автомобильной отрасли. Производители начали использовать HUD для проекции основных параметров на лобовое стекло транспортного средства.

С точки зрения конечного потребителя, в [6] исследователями был проведен опрос на базе выборки, состоящей из 539 человек, в которой респондентам предлагалось дать оценку системе HUD. Большинство респондентов (87%) согласилось с эффективностью восприятия информации в виде Head-up дисплея при управлении транспортным средством. В то же время, в [7] был проведен практический эксперимент, в котором группе людей требовалось проехать два незнакомых маршрута на автомобиле, при этом для визуализации навигационной информации по одному маршруту использовался обычный дисплей мультимедийной системы, а на втором маршруте использовался Head-up дисплей. В результате эксперимента исследователи сделали вывод, что водители допускают меньшее количество навигационных ошибок (0,7 против 1,1) при визуализации примитивной информации на HUD.

Технология Head-up дисплеев развивается параллельно развитию технологий машинного обучения, искусственного интеллекта и беспилотного гражданского транспорта. Уже сейчас HUD внедряются в сферу автономного вождения [8].

Однако перенасыщение информации на таких дополнительных дисплеях может приводить к негативным последствиям. Так, при перегрузке данных пользователь начинает терять фокус с дороги и риск возникновения опасных ситуаций может возрастать [7, 9]. Поэтому необходимо обеспечить фильтрацию информации, которую необходимо выводить на HUD.

Для проектирования Head-up дисплеев существуют определенные правила и классификации объектов, которые должны быть визуализированы. Например, в исследовании [10] были предложены 4 варианта интерфейса отображения информации на лобовом стекле автомобиля, варианты были оценены фокус группой, состоящей из 30 человек. Интерфейсы тестировались в симуляторе вождения. В результате эксперимента были получены выводы по информации, визуализация которой повышает безопасность использования автомобилем. Дисплеи, визуализирующие скорость движения, заставляли участников эксперимента реже превышать скорость и на части маршрута ехать даже немногим медленнее разрешенной скорости. Также в ходе эксперимента исследователи получили информацию о предпочтительных данных, выводимых на HUD, такими данными оказались скорость автомобиля, ограничение скорости, индикация при движении по пересеченной местности, ин-

дикация при движении на малом расстоянии до впереди идущего автомобиля и навигационные подсказки.

Также и в [11, 12] исследователи получили выводы, что наиболее подходящей является визуализация текущей скорости, знаков ограничения скорости и оповещения на критические события, а также выявили недостатки с компоновкой существующих Head-up дисплеев.

В свою очередь проектирование авиационного HUD обладает своими правилами и особенностями. В работе [13] автор рассматривает проектирование такого дисплея и в качестве вывода выделил некоторые правила проектирования: линейные шкалы, более толстая ширина линий (поскольку в большинстве случаев задним фоном выступает голубое небо), градация цветов отображения элементов и сообщений об ошибках – зеленый, желтый, красный.

На основе проведенного выше анализа работ составлена классификация основных визуализируемых объектов Head-up дисплея. В первую очередь стоит разделить дисплеи, предназначенные для наземных транспортных средств и авиационные. На рис. 1 представлена схема с классификацией объектов HUD.

Несмотря на развитие Head-up дисплеев, остаются области, где данная технология еще слабо внедрена. Одной из таких областей являются автономные наземные роботизированные средства.

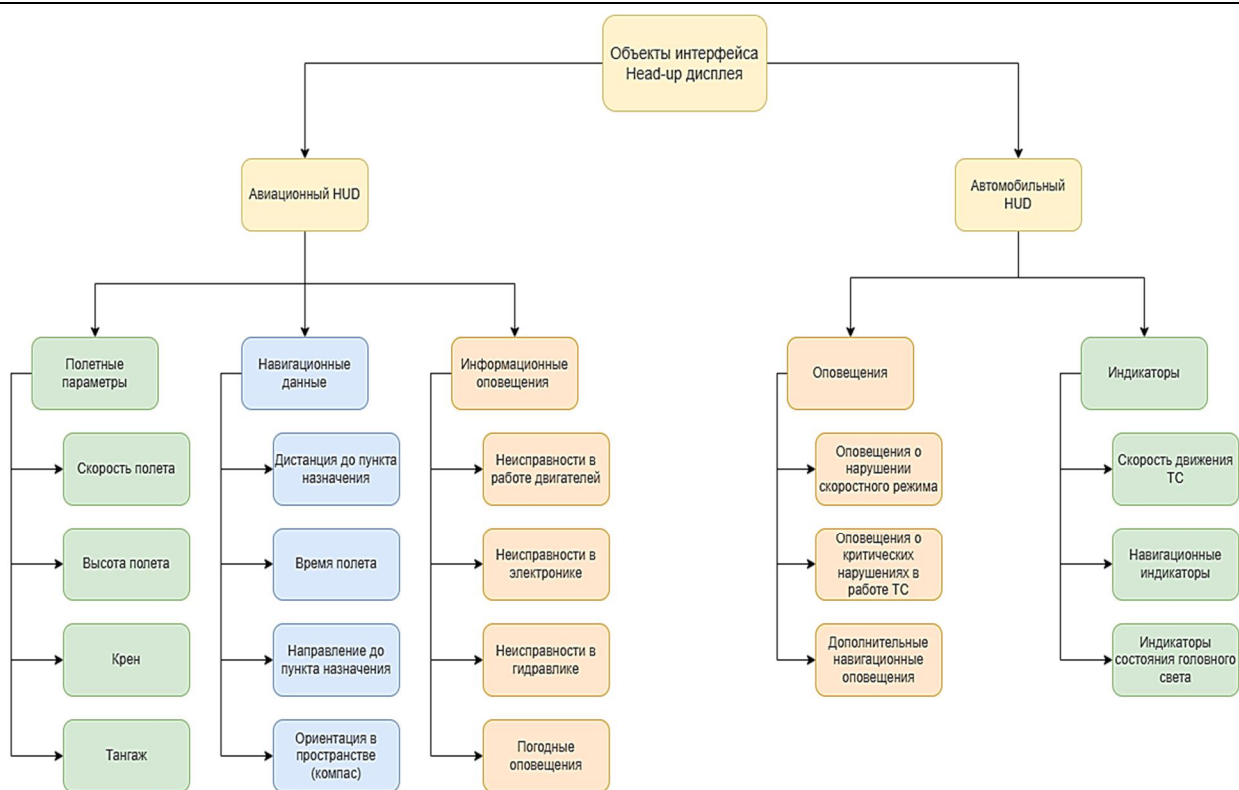


Рис. 1. Классификация объектов HUD

Fig. 1. Classification of HUD objects

Для обеспечения функционирования наземных робототехнических средств используются различные типы сенсорных устройств, с которых поступают разнообразные данные. При отображении таких данных оператору зачастую сложно воспринимать большой объем информации одновременно и своевременно корректировать процесс функционирования робота. Для решения данной проблемы в работе был разработан метод динамического формирования Head-up дисплея пользователя с учетом текущего процесса функционирования автономного робототехнического средства.

Оптимизационная задача, которую необходимо решить для повышения качества взаимодействия пользователя с интерфейсом, заключается в следую-

щем. Необходимо минимизировать количество отображаемой информации D на Head-up дисплее в зависимости от типа выполняемой роботом задачи. Таким образом необходимо найти такой элемент графического интерфейса i используемый в задаче $j - x_{ij}$, чтобы минимизировать количество информации D .

$$f(D) = \min_{x_{ij}} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij}.$$

Значение x_{ij} определяется использованием i -го элемента в j -ой задаче. Где элемент $i = 1, \dots, m$; задача $j = 1, \dots, n$. Таким образом формируется матрица состояний R . Если элемент используется в задаче, то поле матрицы приравнивается к 1, в случае если не используется – к 0:

$$R = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}.$$

Метод, обеспечивающий решение поставленной задачи, описан в следующем разделе.

Материалы и методы

Архитектура системы для динамического формирования HUD представлена на рис. 2.

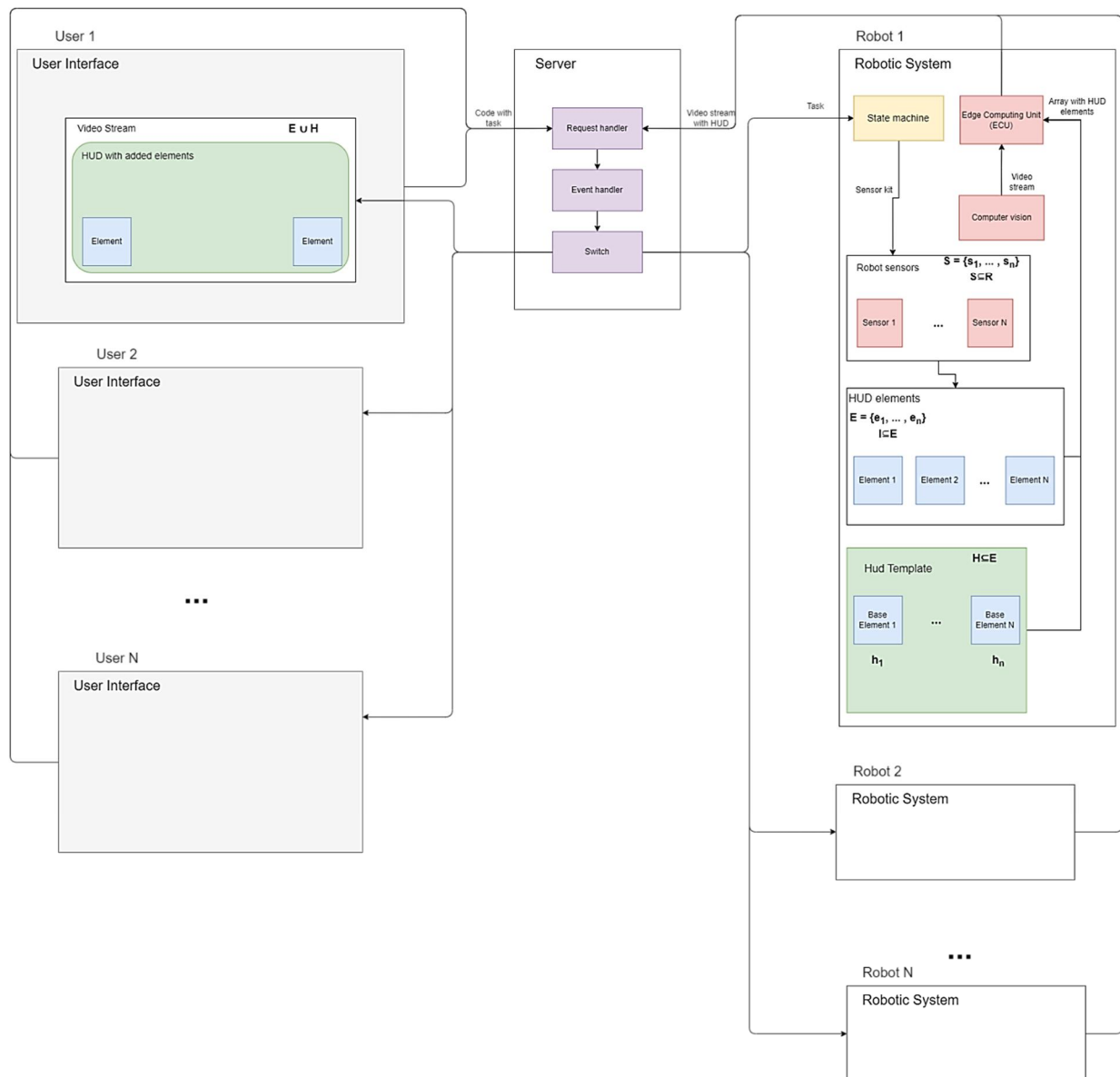


Рис. 2. Архитектура системы для динамического формирования HUD

Fig. 2. System architecture for dynamic HUD formation

Динамическое изменение элементов Head-up дисплея позволяет системе подстраиваться под определенную задачу, выполняемую пользователем и

повышать качество восприятия данных, автоматически выводимых на Head-up дисплей в процессе функционирования. Для повышения качества восприятия

информации с Head-up дисплея был разработан метод динамического формирования HUD'a.

Далее опишем метод для динамического формирования HUD. Основными частями архитектуры являются робототехнические платформы, которые включают в себя множество сенсорных узлов, формирующие данные: $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}$.

Робототехническое средство выполняет задачи, поставленные пользователем – $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_m\}$, на основе машины состояний, представленной множеством $M = \{m_1, m_2, m_3, \dots, m_a\}$, где m – это одно из состояний, в которых может прибывать робот.

При выполнении определенной задачи t используется одно или более состояний из M . С помощью графического интерфейса пользователем назначаются задачи робототехническому средству и происходит отслеживание процесса выполнения данной задачи оператором с помощью Head-up дисплея, состоящего из видеопотока об окружающем роботе пространстве и наложенными на него графическими элементами интерфейса $\{e_1, e_2, e_3, \dots, e_d\}$, где $e \in E$.

Шаблон базового Head-up дисплея $H \subset E$, формируется единожды для каждой определенной системы в зависимости от ее датчиков, обработанные данные с которых необходимо визуализировать вне зависимости от текущего состояния функционирования робота.

На основе текущего состояния m определяется множество данных от сенсорных узлов $W = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_j\}$,

где $W \subset S$. Основываясь на типах датчиков, которые формируют данные $w \in W$, формируется множество элементов i , где $i \in I$ и $I \subseteq E$. I – это множество дополнительных элементов для визуализации информации с датчиков, которые используются в текущем состоянии робототехнического средства $m \in M$, где $f(t): W \rightarrow I, \forall t \in T$. Для формирования конечного вида Head-up дисплея происходит объединение множеств $I \cup H$ и наложение полученных элементов e из двух множеств на видео поток.

Таким образом решением оптимизационной задачи будет являться матрица состояний R , размерностью $E \times T$, состоящая из элементов x_{ij} . Следовательно, матрица состояний будет иметь вид:

$$R = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1T} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{E1} & \dots & x_{ET} \end{bmatrix}.$$

Как видно из архитектуры на рис. 2, наложение элементов HUD на исходные данные для визуализации окружающего пространства происходят на робототехническом средстве и относятся к граничным вычислениям. Граничные вычисления сосредоточены на развертывании в различных сценариях для сокращения сетевого трафика и задержек при принятии решений [14]. Алгоритм для формирования изображения при определенном состоянии m представлен на рис. 3.

В результате работы метода будет формироваться выводимый пользователю графический интерфейс с видеопотоком.

током и наложенными на него элементами Head-up дисплея, отражающего данные с датчиков, необходимых при текущем процессе функционирования.

Данный метод позволяет снизить количество элементов интерфейса и

упростить пользователю восприятие информации при работе с робототехнической системой, что влияет на эргономику процесса управления и упрощает взаимодействие с робототехнической системой.

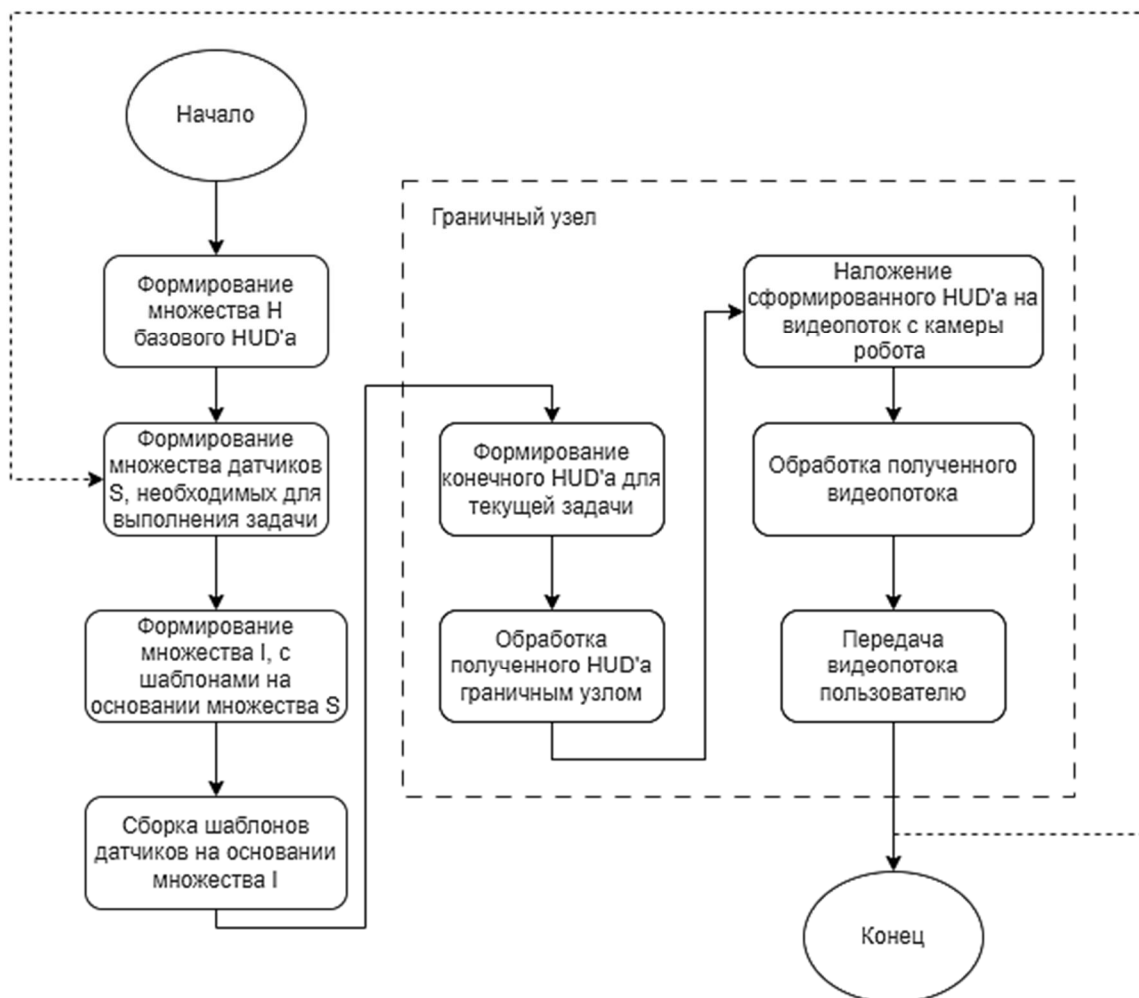


Рис. 3. Блок-схема алгоритма формирования изображения для HUD пользователя

Fig. 3. Block diagram of the image generation algorithm for the user's HUD

Результаты и их обсуждение

В качестве платформы для внедрения Head-up дисплея будет выступать наземная робототехническая платформа (НРП) [15-17]. Она представляет собой шасси с четырехколесной кинематикой дифференциального типа и распределенной трехуровневой архитектурой

системы управления ее электротехническим оснащением (рис. 4).

Рассматриваемая НРП предназначена для апробации базовых принципов функционирования наземных робототехнических систем (РС), программирования многофункциональных роботов с распределенной сенсорной системой [18-20].

Как видно из рис. 4 в состав базовых элементов конструкции наземной робототехнической платформы входят:

Микрокомпьютер Raspberry Pi 4;
Ультразвуковой датчик;
Электропривод колесной пары с датчиком оборотов;
RFID-датчик;

Инфракрасные датчики;
Светодиоды видимого и ультрафиолетового спектров;
Сервопривод USB-камеры технического зрения;
USB-камера;
Широконаправленная RPi-камера.

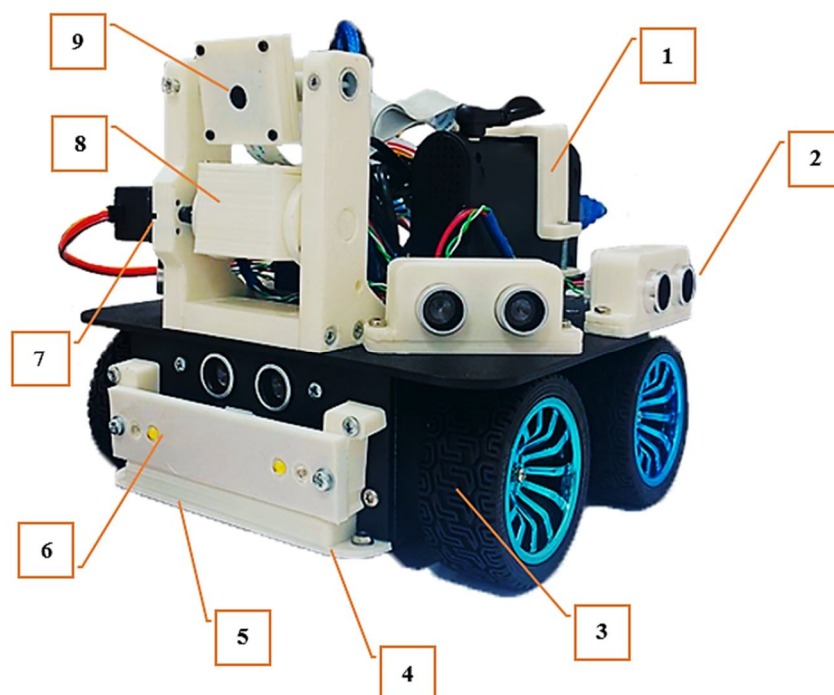


Рис. 4. Наземная робототехническая платформа

Fig. 4. Ground robotic platform

Датчики, перечисленные выше, представляют из себя множество узлов робототехнической платформы *R*.

Был разработан дизайн интерфейса Head-up дисплея, на котором реализована визуализация значений с вышеперечисленных датчиков. Цветом интерфейса был выбран зеленый. Такой выбор обусловлен восприятием данного цвета человеком. В [21] было проведено исследование, и из полученных результатов можно сделать вывод, что для взрослого

человека визуальные объекты зеленого цвета вызывают чувство спокойствия и меньшее раздражение глаз. Это обусловлено короткой волной данного цвета, а также психологически сложившейся ассоциации данного цвета с положительными и спокойными эмоциями. Кроме того, в пользовательских интерфейсах часто зеленым цветом обозначают положительный результат или начало действия, например кнопки «Начать». Элементы HUD'а представлены на рис. 5.

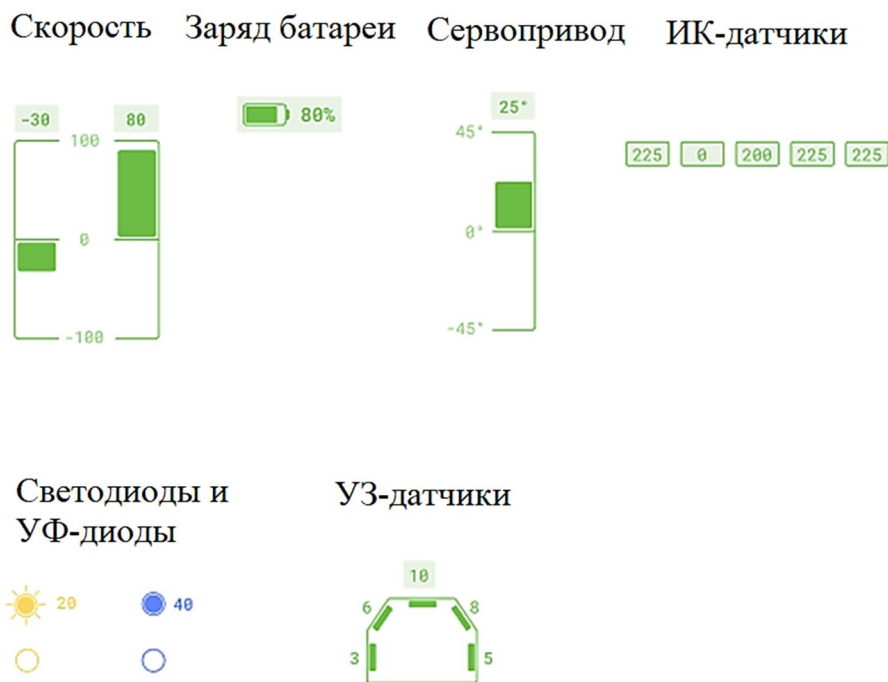


Рис. 5. Элементы Head-up дисплея

Fig. 5. Head-up display elements

Множество элементов H будет состоять из датчиков скорости (v), заряда батареи (b), сервопривода (s), диодов (d). Таким образом можно записать $H = \{v, b, s, d\}$. Эти элементы формируют базовый HUD.

Динамически могут быть добавлены элементы ИК-датчиков (r) и УЗ-датчиков (z). Таким образом множество $I = \{r, z\}$.

Также можно сформировать множество элементов $E = \{v, b, s, d, r, z\}$.

Далее будут рассмотрены три задачи:

- 1) свободное движение робота;
- 2) перемещение робота по лабиринту;
- 3) движение по смешанной трассе, включающей движение по лабиринту, движение по линии и свободное движение.

Таким образом можно составить матрицу состояний S для поставленной

задачи. Имеется 6 датчиков (i) и 3 сценария (j), соответственно матрица состояний будет размерностью 6×3 :

$$R = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} \\ x_{51} & x_{52} & x_{53} \\ x_{61} & x_{62} & x_{63} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Зависимость состояний от определенных задач, описанных выше, отображена на диаграмме состояний на рис. 6.

При включении базового сценария свободного движения, на HUD выводятся только датчики, входящие в множество H . Наземный робот с наложенным интерфейсом HUD представлен на рис. 7.

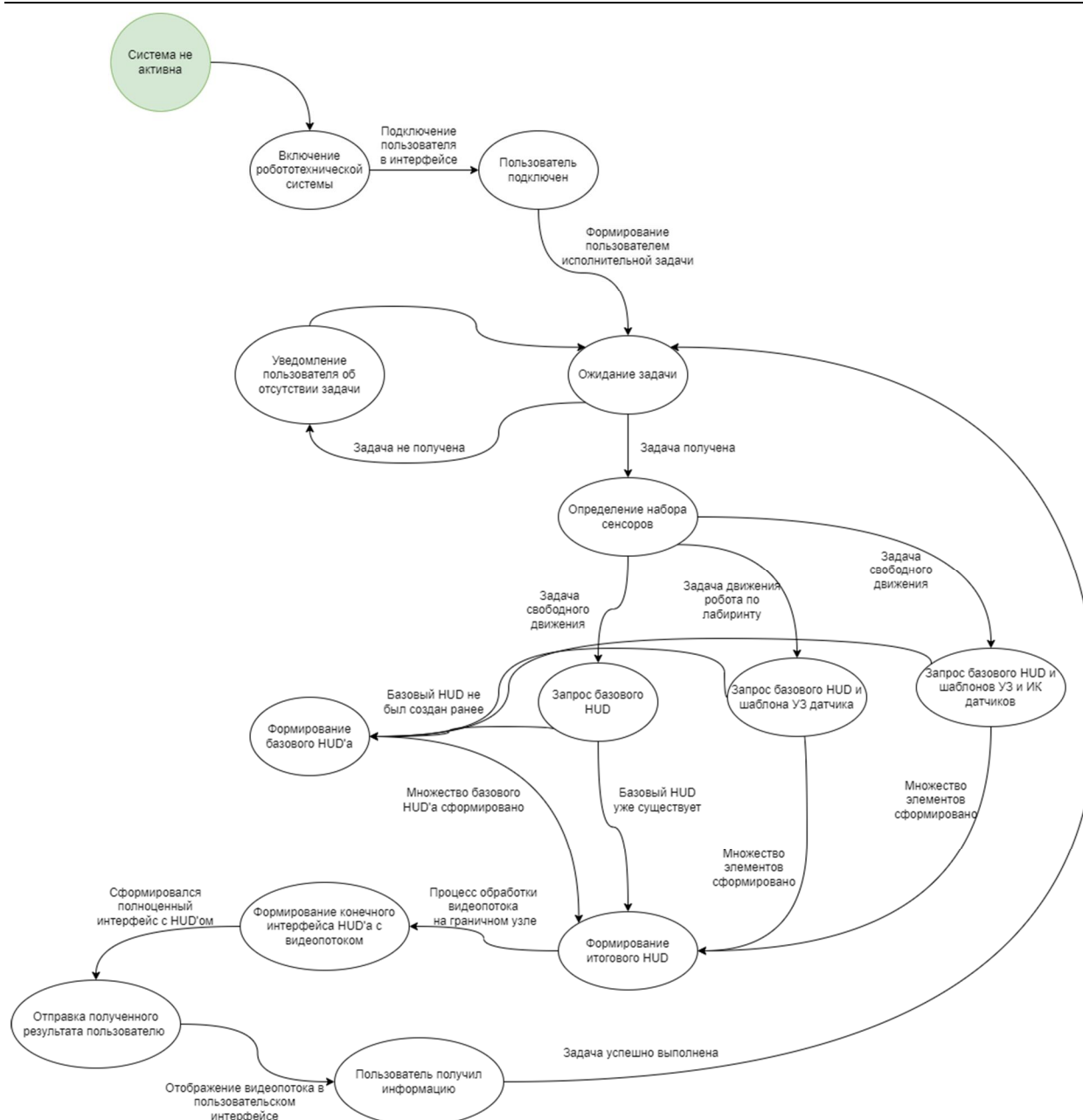


Рис. 6. Диаграмма состояний

Fig. 6. State diagram

Как видно на рис. 7, базовый сценарий позволяет отслеживать только основные параметры робототехнической системы. В данном сценарии не используются дополнительные датчики, их отображение будет негативно сказываться на пользовательском интерфейсе и удобстве взаимодействия с роботом. Однако пользователь может в любой мо-

мент поменять выполняемый сценарий, назначив другую задачу. В этом случае благодаря методу динамического изменения HUD будет выведена информация и о датчиках, не представленных в задаче свободного движения. Применение других сценариев использования продемонстрировано на рис. 8 и 9.



Рис. 7. Интерфейс HUD при запуске базовой задачи

Fig. 7. HUD interface when starting a basic task

При функционировании робота в режиме прохождения в лабиринте с использованием УЗ-датчиков помимо базовых значений добавляется множество E , состоящее в данном случае из одного элемента $E = \{z\}$.

Как видно на рис. 8, при запуске задачи с отслеживанием расстояний используется группа УЗ-датчиков, которые отображаются в правом нижнем уг-

лу интерфейса. Данный режим предназначен для использования робота в режиме прохождения лабиринта.

При решении комплексной задачи движения с использованием всех дополнительных датчиков, помимо базовых значений добавляется множество E , состоящее в данном случае из двух элементов $E = \{z, r\}$.

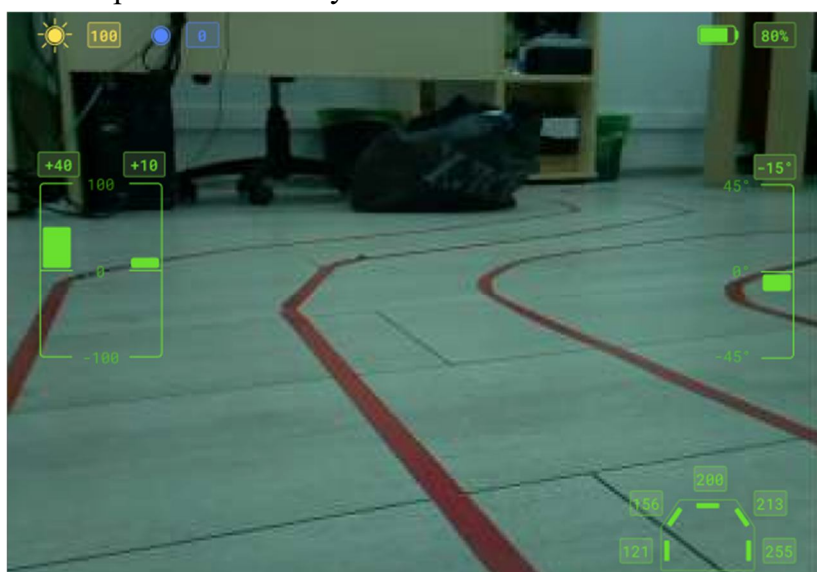


Рис. 8. Интерфейс HUD при запуске задачи с использованием УЗ-датчиков

Fig. 8. HUD interface when starting a task using ultrasonic sensors



Рис. 9. Интерфейс HUD при запуске задачи с использованием всех датчиков

Fig. 9. HUD interface when starting a task using all sensors

На рис. 9, при запуске комбинированной задачи используется группа УЗ-датчиков, которые отображаются в правом нижнем углу интерфейса, и группа ИК-датчиков, которые отображаются в левом нижнем углу интерфейса. Данный режим предназначен для использования робота в комбинированных условиях движения как по линии, так и в лабиринте. При помощи полученной информации оператор сможет в реальном времени наблюдать за параметрами с датчиков, при этом не отвлекаясь от процесса управления.

Исследование на контрольной группе

Для апробации разработанного решения была собрана фокус группа, состоящая из 32 человек. Для эксперимента использовалась наземная робототехническая платформа в трех задачах:

1. Движение по RFID меткам со считыванием ArUco-маркеров, расположен-

ных на разной высоте от земли. В данном сценарии использовался только базовый набор датчиков.

2. Движение по лабиринту, при этом с преодолением зон с затемнением, в которых необходимо включать светодиоды. В данной задаче к базовому набору датчиков добавляются еще данные с УЗ-датчиков.

3. Движение по лабиринту по заранее подготовленной кривой линии. В данной задаче использовался полный набор датчиков. Для движения по кривой использовался набор ИК-датчиков.

Каждую из задач пользователи проходили трижды: первый раз без использования HUD, второй с использованием фиксированного HUD и третий с использованием динамически формируемого Head-up дисплея. После тестирования всех трех типов визуализации данных респондентам было предложено выбрать наиболее удобный для них ва-

риант работы с наземной робототехнической платформы. Большинство опрошенных (28 из 32, 87,5%) отдали предпочтение работе с динамическим HUD. Несколько участников (3 из 32, 9,375%) предпочли использовать статический фиксированный HUD. Только один участник (3,125%) предпочел работу без использования Head-up дисплея, а данные с датчиков отслеживать в отдельном окне, при этом переключаясь с вкладки с видеопотоком, приостанавливая работу. Большинство участников отметили улучшение восприятия информации при работе с динамическим HUD, а также улучшенную эргономику в процессе управления. В качестве заключения можно отметить, что разработка динамически формируемого Head-up дисплея для наземных робототехнических средств является актуальной задачей.

Выводы

В данной статье проведен анализ применимости Head-up дисплеев в сферах авиации и автомобильной техники. На базе полученных данных была составлена классификация выводимой на HUD информации. Был предложен метод и описана архитектура для динамического формирования Head-up дисплея для робототехнических систем. Была произведена разработка Head-up дисплея для наземной робототехнической платформы, проанализирован ряд задач, где использовались различные комбинации сенсоров робототехнического средства. Апробация разработанного метода показала, что 28 из 32 человек предпочли использовать динамически формируемые HUD, что показывает перспективность дальнейшего развития данного решения.

Список литературы

1. Yamin P.A.R., Park J., Kim H.K. Towards a Human-Machine Interface Guidance for in-Vehicle Augmented Reality Head-up Displays // *ICIC Express Letters*. 2021; 15(12): 1313–1318.
2. Head-up display with dynamic depth-variable viewing effect / K. Li, Y. Geng, A.Ö. Yöntem, D. Chu, V. Meijering, E. Dias, L. Skrypchuk // *Optik*. 2020; 221: 165319.
3. Fadden S., Ververs P.M., Wickens C.D. Costs and benefits of head-up display use: A meta-analytic approach // In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*. 1998; 42(1): 16–20.
4. A cognitive study of multicolour coding for the head-up display (HUD) of fighter aircraft in multiple flight environments / B. Ling, L. Bo, S. Bingzheng, Q. Lingcun, X. Chengqi, N. Yafeng // In *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1215(1): 012032.
5. Head-up display architecture development for perspective civil aircraft / E.S. Neretin, S.A. Dyachenko, V.A. Chufirin, D.M. Ilyashenko // In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 868(1): 012030.

6. Analyzing Drivers' Attitude towards HuD system using a stated Preference survey / H. Guo, F. Zhao, W. Wang, X. Jiang // *Advances in Mechanical Engineering*. 2014; 6: 380647.
7. Burnett G.E. A road-based evaluation of a head-up display for presenting navigation information // In *Proc. of the Tenth International Conference on HumanComputer Interaction (2003)*. 2019: 180–184.
8. Murugan S., Sampathkumar A., Kanaga Suba Raja S., Ramesh S., Manikandan R., Gupta D. Autonomous vehicle assisted by heads up display (HUD) with augmented reality based on machine learning techniques // In *Virtual and Augmented Reality for Automobile Industry: Innovation Vision and Applications*. 2022: 45–64.
9. Hit the brakes! Augmented reality head-up display impact on driver responses to unexpected events / M. Smith, L. Jordan, K. Bagalkotkar, S. Sai Manjuluri, R. Nittala, J. Gabbard // In *12th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. 2020: 46–49.
10. Pečecnik K.S., Tomažič S., Sodnik J. Design of head-up display interfaces for automated vehicles // *International Journal of Human-Computer Studies*. 2023; 177: 103060.
11. Liu Y.C., Wen M.H. Comparison of head-up display (HUD) vs. head-down display (HDD): driving performance of commercial vehicle operators in Taiwan // *International Journal of Human-Computer Studies*. 2004; 61(5): 679–697.
12. A study on user experience of automotive HUD systems: Contexts of information use and user-perceived design improvement points / D. Beck, J. Jung, J. Park, W. Park // *International Journal of Human–Computer Interaction*. 2019; 35(20): 1936–1946.
13. Ergonomic design and evaluation of visual coding for aircraft head-up display / X. Xiao, X. Wanyan, D. Zhuang, Z. Wei // In *2012 5th International Conference on BioMedical Engineering and Informatics* 2012: 748–752.
14. All one needs to know about fog computing and related edge computing paradigms: A complete survey / A. Yousefpour, C. Fung, T. Nguyen, K. Kadiyala, F. Jalali, A. Niakanlahiji, J. Kong, J.P. Jue // *Journal of Systems Architecture*. 2019; 98: 289–330.
15. Крестовников К.Д., Ерашов А.А. Разработка архитектуры и обобщенной структуры модулей распределенной системы управления робототехническими комплексами различного назначения // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2022; 10(3): 201–212.
16. Метод оценки времени беспроводной передачи энергетических ресурсов между двумя роботами / А.А. Ерашов, К.В. Камынин, К.Д. Крестовников, А.И. Савельев // *Информатика и автоматизация*. 2021; 20(6): 1279–1306.
17. Алгоритм планирования локальных траекторий движения наземного робототехнического средства с учетом глобального маршрута / А.И. Савельев, К.В. Камынин, А.А. Ерашов, Е.О. Черских // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2023; 11(3): 188–196.
18. Kuznetsov L., Kozyr P., Levonevskiy D. Algorithm of Target Point Assignment for Robot Path Planning Based on Costmap Data // In *Electromechanics and Robotics: Proceed-*

ings of 16th International Conference on Electromechanics and Robotics" Zavalishin's Readings"(ER (ZR) 2021). 2022: 121–130.

19. Захаров К.С., Савельев А.И. Сглаживание кривизны траектории движения наземного робота в трехмерном пространстве // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 107–125.

20. Черноусова П.М., Савельев А.И., Черских Е.О. Образовательный онлайн-курс наземной робототехники СПб ФИЦ РАН // XIV Санкт-Петербургский конгресс «Профессиональное образование, наука и инновации В XXI веке». СПб., 2022: 230–234.

21. Rider R.M. Color psychology and graphic design applications // *Senior Honors Theses*. 2010.

References

1. Yamin P.A.R., Park J., Kim H.K. Towards a Human-Machine Interface Guidance for in-Vehicle Augmented Reality Head-up Displays. *ICIC Express Letters*. 2021; 15(12): 1313–1318.

2. Li K., Geng Y., Yöntem A.Ö., Chu D., Meijering V., Dias E., Skrypchuk L. Head-up display with dynamic depth-variable viewing effect. *Optik*. 2020; 221: 165319.

3. Fadden S., Ververs P.M., Wickens C.D. Costs and benefits of head-up display use: A meta-analytic approach. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*. 1998; 42(1): 16–20.

4. Ling B., Bo L., Bingzheng S., Lingcun Q., Chengqi X., Yafeng N. A cognitive study of multicolour coding for the head-up display (HUD) of fighter aircraft in multiple flight environments. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1215(1): 012032.

5. Neretin E.S., Dyachenko S.A., Chufirin V.A., Ilyashenko D.M. Head-up display architecture development for perspective civil aircraft. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 868(1): 012030.

6. Guo H., Zhao F., Wang W., Jiang X. Analyzing Drivers' Attitude towards HuD system using a stated Preference survey. *Advances in Mechanical Engineering*. 2014; 6: 380647.

7. Burnett G.E. A road-based evaluation of a head-up display for presenting navigation information. In *Proc. of the Tenth International Conference on HumanComputer Interaction (2003)*. 2019: 180–184.

8. Murugan S., Sampathkumar A., Kanaga Suba Raja S., Ramesh S., Manikandan R., Gupta D. Autonomous vehicle assisted by heads up display (HUD) with augmented reality based on machine learning techniques. In *Virtual and Augmented Reality for Automobile Industry: Innovation Vision and Applications*. 2022: 45–64.

9. Smith M., Jordan L., Bagalkotkar K., Sai Manjuluri S., Nittala R., Gabbard J. Hit the brakes! Augmented reality head-up display impact on driver responses to unexpected events. In *12th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. 2020: 46–49.

10. Pečečnik K.S., Tomažič S., Sodnik J. Design of head-up display interfaces for automated vehicles. *International Journal of Human-Computer Studies*. 2023; 177: 103060.

11. Liu Y.C., Wen M.H. Comparison of head-up display (HUD) vs. head-down display (HDD): driving performance of commercial vehicle operators in Taiwan. *International Journal of Human-Computer Studies*. 2004; 61(5): 679–697.
12. Beck D., Jung J., Park J., Park W. A study on user experience of automotive HUD systems: Contexts of information use and user-perceived design improvement points. *International Journal of Human-Computer Interaction*. 2019; 35(20): 1936–1946.
13. Xiao X., Wanyan X., Zhuang D., Wei Z. Ergonomic design and evaluation of visual coding for aircraft head-up display. In *2012 5th International Conference on BioMedical Engineering and Informatics 2012*: 748–752.
14. Yousefpour A., Fung C., Nguyen T., Kadiyala K., Jalali F., Niakanlahiji A., Kong J., Jue J.P. All one needs to know about fog computing and related edge computing paradigms: A complete survey. *Journal of Systems Architecture*. 2019; 98: 289–330.
15. Krestovnikov K.D., Erashov A.A. Razrabotka arhitektury i obobshchennoj struktury modulej raspredelennoj sistemy upravleniya robototekhnicheskimi kompleksami razlichnogo naznacheniya [Development of the architecture and generalized structure of modules for a distributed control system for robotic complexes for various purposes]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika = Robotics and Technical Cybernetics*. 2022; 10(3): 201–212.
16. Erashov A.A., Kamynin K.V., Krestovnikov K.D., Saveliev A.I. Metod ocenki vremeni besprovodnoj peredachi energeticheskikh resursov mezhdv dvumya robotami [A method for estimating the time of wireless transfer of energy resources between two robots]. *Informatika i avtomatizaciya = Informatics and Automation*. 2021; 20(6): 1279–1306.
17. Saveliev A.I., Kamynin K.V., Erashov A.A., Cherskikh E.O. Algoritm planirovaniya lokal'nyh traektorij dvizheniya nazemnogo robototekhnicheskogo sredstva s uchetom global'nogo marshruta [An algorithm for planning local trajectories of movement of a ground-based robotic vehicle, taking into account the global route]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika = Robotics and Technical Cybernetics*. 2023; 11(3): 188–196.
18. Kuznetsov L., Kozyr P., Levonevskiy D. Algorithm of Target Point Assignment for Robot Path Planning Based on Costmap Data. In *Electromechanics and Robotics: Proceedings of 16th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" (ER (ZR) 2021)*. 2022: 121–130.
19. Zakharov K. S., Saveliev A. I. Smoothing the Curvature of Trajectory of Ground Robot in 3D Space. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 107–125 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-107-125>.
20. Chernousova P.M., Saveliev A.I., Cherskikh E.O. [Educational online course on ground robotics of St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences]. XIV Sankt-Peterburgskij kongress “Professional'noe obrazovanie, nauka i innovacii V XXI veke” = XIV St. Petersburg Congress “Vocational education, science and innovation in the 21st century”. St. Petersburg, 2022: 230–234 (In Russ.).

21. Rider R.M. Color psychology and graphic design applications. *Senior Honors Theses*. 2010.

Информация об авторах / Information about the Authors

Заикин Михаил Игоревич, аспирант, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: zmaik@live.com, ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-8149-5804>.

Mikhail I. Zaikin, Post-Graduate Student, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: zmaik@live.com, ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-8149-5804>

Летенков Максим Андреевич, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социокберфизических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: o1prime@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5745-5354>

Maksim A. Letenkov, Junior Researcher of Laboratory of Big Data Technologies in Socio-Cyberphysical Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg, Russian, e-mail: o1prime@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5745-5354>.

Камынин Константин Викторович, программист лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: kamynin.k@iias.spb.su, ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-8096-4156>.

Konstantin V. Kamynin, Programmer of Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian, e-mail: kamynin.k@iias.spb.su, ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-8096-4156>

Астапова Марина Алексеевна, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социокберфизических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: astapova.m@iias.spb.su, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9121-894X>

Marina A. Astapova, Junior Researcher of Laboratory of Big Data Technologies in Socio-Cyberphysical Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: astapova.m@iias.spb.su, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9121-894X>

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-97-110>

Вибротранспортирующее устройство в составе автоматизированного сборочного комплекса

А.В. Мальчиков ¹ ✉, О.В. Емельянова ¹, Е.Н. Политов ¹, В.В. Марченко ¹

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

✉ e-mail: zveroknnp@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Повышение эффективности проектирования вибротранспортирующих устройств в составе автоматизированного комплекса, за счет использования математической модели движения деталей под действием вибрации, настройка и верификация которой произведена в ходе натурных испытаний на лабораторном оборудовании.

Задачи. Разработка математической модели виброперемещения детали и постановка вычислительных экспериментов. Подготовка лабораторного стенда, постановка и проведения комплекса натурных экспериментов. Сравнительный анализ результатов экспериментов и оценка адекватности и применимости математической модели при проектировании вибротранспортирующих устройств.

Методы. Исследование выполнено в соответствии с общепринятыми методами проведения и планирования экспериментальных исследований. При моделировании движения деталей под действием вибрации использовалась нелинейная модель трения и оригинальный алгоритм интегрирования, позволяющий получить решение для разрабатываемой системы.

Результаты. В ходе работы была разработана математическая модель движения деталей по направляющим чаши вибробункера, отличающаяся возможностью задания горизонтальной и вертикальной составляющей вибрации и использующая нелинейную модель трения, позволяющая моделировать процессы при нулевой относительной скорости движения детали и чаши вибробункера. Выполнен комплекс натурных испытаний, доказавший адекватность разработанной модели.

Заключение. Предлагаемая в работе математическая модель перемещения деталей под действием двухкомпонентной вибрации, позволяет значительно повысить эффективность проектирования и настройки вибротранспортирующего устройства в составе сборочной автоматизированной линии, что может найти применения в широком диапазоне производственных задач.

Ключевые слова: математическая модель; вибропитатель; вибробункер; моделирование виброперемещений; натурные эксперименты; автоматизация производства.

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: Вибротранспортирующее устройство в составе автоматизированного сборочного комплекса / А.В. Мальчиков, О.В. Емельянова, Е.Н. Политов, В.В. Марченко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(3): 97-110. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-97-110>.

Поступила в редакцию 26.08.2023

Подписана в печать 14.09.2023

Опубликована 28.10.2023

© Мальчиков А.В., Емельянова О.В., Политов Е.Н., Марченко В.В., 2023

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2023; 27(3): 97-110

Vibration Transporting Device as Part of an Automated Assembly Complex

Andrey V. Mal'chikov ¹ ✉, Oksana V. Emelyanova ¹,
Evgeniy N. Politov ¹, Viktor V. Marchenko ¹

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

✉ e-mail: zveroknnp@gmail.com

Abstract

Purpose of research. Improving the efficiency of designing vibration-transporting devices as part of an automated complex, through the use of a mathematical model of the movement of parts under the influence of vibration, the adjustment and verification of which was carried out during field tests on laboratory equipment.

Tasks. Development of a mathematical model of vibration displacement and carried out computational experiments. Preparation of a laboratory stand, setting up and conducting a complex of field experiments. Comparative analysis of experimental results and assessment of the adequacy and applicability of the mathematical model in the design of vibration-transporting devices.

Methods. The study was carried out in accordance with generally accepted methods of conducting and planning experimental studies. When modeling the movement of parts under the influence of vibration, a nonlinear friction model and an original integration algorithm were used to obtain a solution for the system being developed.

Results. In the course of the work, a mathematical model of the movement of parts along the guides of the vibrobunker bowl was developed, characterized by the possibility of specifying the horizontal and vertical component of vibration and using a nonlinear friction model that allows modeling processes at zero relative speed of movement of the part and the bowl. A set of full-scale tests was performed, which proved the adequacy of the developed model.

Conclusion. The mathematical model proposed in the paper for moving parts under the action of two-component vibration can significantly improve the efficiency of designing and configuring a vibration-transporting device as part of an automated assembly line, which can find applications in a wide range of production tasks.

Keywords: mathematical model; vibration feeder; vibration bunker; vibration displacement modeling; field experiments; production automation.

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: Mal'chikov A. V., Emelyanova O. V., Politov E.N., Marchenko V.V. Vibration Transporting Device as Part of an Automated Assembly Complex. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(3): 97-110 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-97-110>.

Received 26.08.2023

Accepted 14.09.2023

Published 28.10.2023

Введение

Одним из главных направлений развития современной науки и техники является широкое внедрение в различные отрасли промышленности средств механизации и автоматизации технологических процессов. Данные средства являются одним из основных условий роста производительности труда, снижения себестоимости изготовления продукции, а также улучшения её качества. Механизация и автоматизация производственных процессов в значительной степени повышает безопасность работы и улучшает условия труда рабочих [1-4].

Автоматизация процессов транспортировки и подачи деталей приобретает

большое значение при создании автоматических и полуавтоматических линий, т.к. надежная и экономичная конструкция загрузочного устройства, гарантирующая бесперебойную подачу правильно ориентированных в пространстве предметов обработки, во многом определяет качественные и количественные показатели всей линии.

В рамках работы рассматривается полуавтоматическая сборочная линия для электротехнических изделий, включающая машину контактной сварки, робот-манипулятор, вибропитатель и систему управления [5]. Схема производственной цепочки показана на рис. 1.

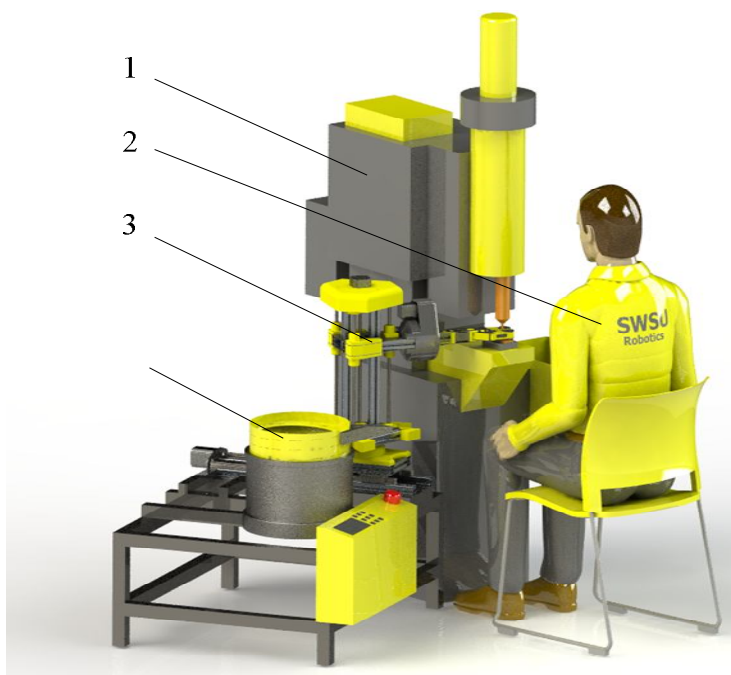


Рис. 1. Полуавтоматическая сборочная линия, оснащенная вибротранспортирующим устройством: 1 – машина контактной сварки; 2 – оператор-сборщик; 3 – робот-манипулятор; 4 – вибробункер

Fig. 1. Semi-automatic assembly line equipped with a vibration conveying device: 1 – contact welding machine; 2 – assembly operator; 3 – robotic arm; 4 – vibratory bowl feeder

Важнейшим этапом в процессе пуско-наладочных работ является настройка параметров питающего напряжения, отвечающего за характеристики вибрационного воздействия, для реализации требуемых параметров движения деталей. Одним из путей повышения эффективности оптимизации параметров вибрационного воздействия является математическое моделирование, которое связано с рядом принятых допущений, поэтому актуальной является задача верификации разрабатываемых моделей натурными экспериментами [6-7].

Материалы и методы

Для изучения влияния параметров вибрационного воздействия на перемещение транспортируемых деталей, была разработана математическая модель, где перемещаемая деталь представлена материальной частицей, движущейся по наклонной плоскости под действием силы, изменяющейся по гармоническому закону. Будем считать, что частица движется без отрыва от поверхности. Расчетная схема виброперемещения частицы представлена на рис. 2 [8, 9].

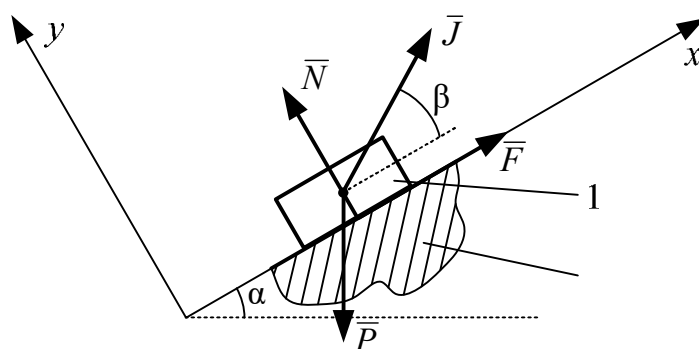


Рис. 2. Расчетная схема вибротранспортирования: 1 – перемещаемая деталь; 2 – направляющая чаши вибробункера

Fig. 2. Design scheme for vibrotransportation: 1 – movable detail; 2 – vibrobunker bowl guide

Материальная частица массой m находится на поверхности, расположенной под углом α к горизонту. На частицу действует сила тяжести $\bar{P}$, сила нормальной реакции опоры $\bar{N}$ и сила трения $\bar{F}$. Движение частицы начинается в том случае, когда возмущающая сила $\bar{J}$, действующая под углом β к поверхности, превышает силу трения $\bar{F}$.

Дифференциальные уравнения относительного движения материальной

частицы в осях xOy , жёстко связанных с вибрирующей плоскостью, имеют вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mA\omega^2 \cos \beta \sin \omega t - mg \sin \alpha + F \\ m\ddot{y} = mA\omega^2 \sin \beta \sin \omega t - mg \cos \alpha + N. \end{cases} \quad (1)$$

При движении частицы по вибрирующей поверхности ($y \equiv 0$), силу сухого трения F определим следующим образом [10]:

$$F = \begin{cases} -fN \operatorname{sign}(\dot{x}) & \text{при } \dot{x} \neq 0 \\ -(\sum F) & \text{при } (\dot{x} = 0) \wedge (|\sum F| \leq fN) \\ -fN \operatorname{sign}(\sum F) & \text{при } (\dot{x} = 0) \wedge (|\sum F| > fN), \end{cases} \quad (2)$$

где $\sum F = mA\omega^2 \cos \beta \sin \omega t - mg \sin \alpha - m\ddot{x}$;
 A – амплитуда внешней силы; f – коэффициент трения скольжения, который может быть определен экспериментально [11-12], а нормальная реакция определяется из (1):

$$N = mg \cos \alpha - mA\omega^2 \sin \beta \sin \omega t. \quad (3)$$

С помощью программного пакета MATLAB была разработана программа, позволяющая получить численное решение системы дифференциальных уравнений и вывести результаты в виде

временных диаграмм при различных параметрах системы. В качестве примера математического моделирования рассмотрим движение частицы массой $m = 1$ г при перемещениях чаши виб-робункера с амплитудами $A_x = 1.0$ мм, $A_y = 0.2$ мм и угловой частотой $\omega = 314.16$ рад/с (50 Гц). Угол наклона на-правляющей чаши вибробункера $\beta = 1.84^\circ$. Покажем результаты численного моделирования в виде временных диаграмм.

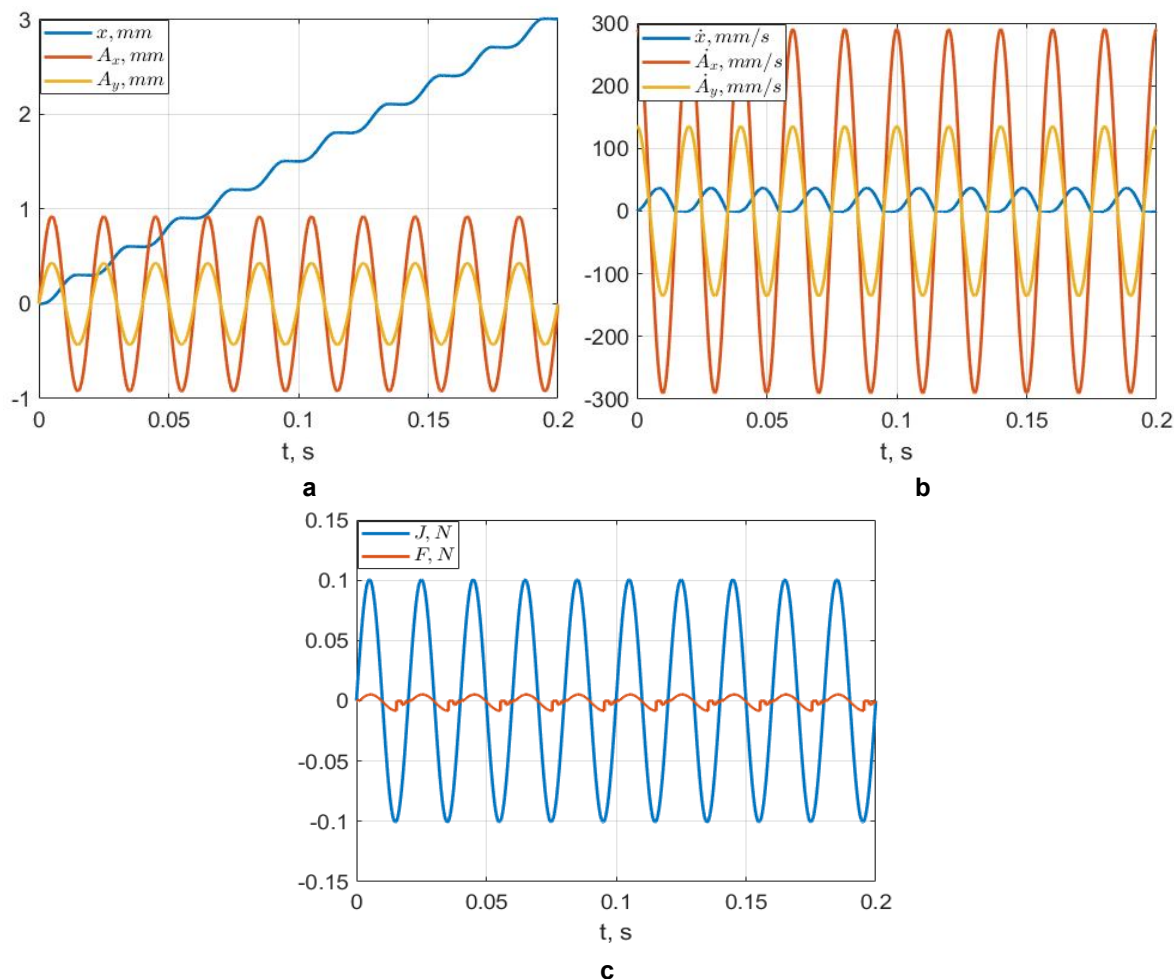


Рис. 3. Результаты численного моделирования в виде временных диаграмм: **a** – перемещения детали x , перемещения чаши A_x , A_y ; **b** – скорость перемещения детали $\dot{x}$, скорость чаши $\dot{A}_x$, $\dot{A}_y$; **c** – силы J и F , действующие на деталь

Fig. 3. The results of numerical simulation in the form of time diagrams: **a** – the movement of the detail x , the movement of the bowl A_x , A_y ; **b** – the speed of the detail $\dot{x}$, the speed of the bowl $\dot{A}_x$, $\dot{A}_y$; **c** – the forces J и F acting on the detail

Как видно из графика на рис. 3, а, частица за 0,2 секунды проходит расстояние около 3 мм, что дает скорость движения 15 мм/с, при этом максимальное значение внешней силы $J = 0,1$ Н при массе детали $m = 1$ г. Отметим, что при

заданных параметрах вибрации деталь практически не смещается назад. При увеличении суммарной амплитуды колебаний чаши наблюдается увеличение линейной скорости движения детали.

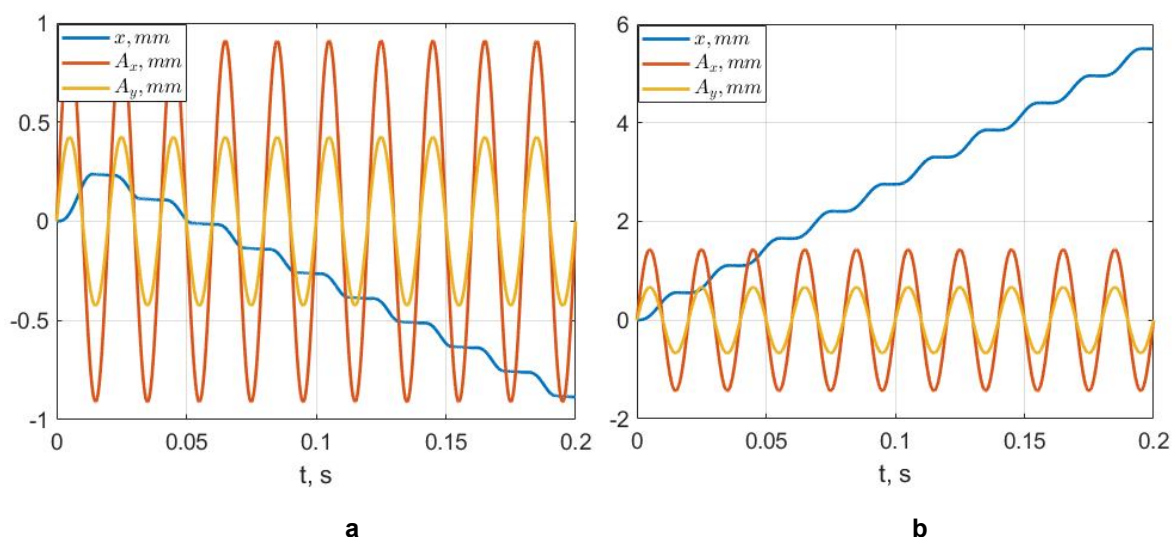


Рис. 4. Результаты моделирования движения детали: **а** – при $A_x = 1$ мм, $A_y = 0,1$ мм; **б** – при $A_x = 1,5$ мм, $A_y = 0,5$ мм

Fig. 4. Results of modeling: **a** – at $A_x = 1$ mm, $A_y = 0,1$ mm; **b** – at $A_x = 1,5$ mm, $A_y = 0,5$ mm

В результате моделирования при $A_x = 1$ мм и $A_y = 0,1$ мм (рис. 4, а) скорость движения отрицательная и составляет -4 мм/с, то есть детали проскальзывают вниз по направляющим чаши бункера под действием силы тяжести. Увеличение амплитуд до $A_x = 1,5$ мм, $A_y = 0,5$ мм (рис. 4, б), позволяет получить скорость порядка 27,5 мм/с.

Полученная математическая модель позволяет установить скоростные параметры движения для деталей различной массы и при различных параметрах возмущающего воздействия, коэффици-

ентах трения и углах наклона направляющих чаши.

Результаты и их обсуждение

Для верификации полученных в процессе моделирования результатов был выполнен комплекс натурных испытаний на лабораторном оборудовании, включающем вибробункер, блок управления и измерительную систему, позволяющую оценивать как параметры вибрации, так и характеристики движения транспортируемых деталей.

Внешний вид и схема лабораторного стенда показаны на рис. 5.

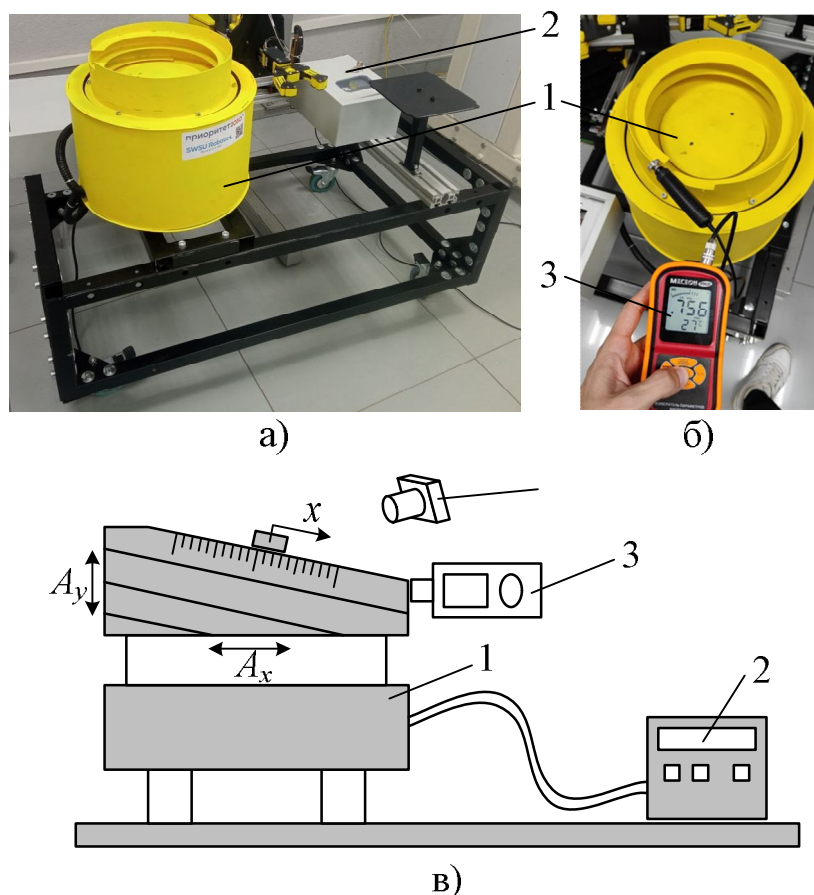


Рис. 5. Внешний вид стенда (а), процесс измерения горизонтальной амплитуды виброперемещений (б), схема лабораторной установки (в): 1 – вибробункер; 2 – блок управления; 3 – виброметр МЕГЕОН 09631; 4 – видеокамера

Fig. 5. The appearance of the stand (а), the process of measuring the horizontal amplitude of vibration displacements (б); the scheme of the laboratory stand (в): 1 – vibratory bowl feeder; 2 – control unit; 3 – vibrometer MEGEON 09631; 4 – camcorder

Основу исследовательской установки составляет вибробункер (1), формирующий винтовое движение чаши, характеризующееся горизонтальной A_x , и вертикальной A_y , амплитудой, получающий двухфазное питание от блока управления. Питающие напряжения поступают с блока управления (2) на электромагниты, являющиеся частью электромеханической системы вибробункера, и формирующие винтовое движение чаши. Фаза и частота напряжений общая, а значения амплитуды сигналов

влияют на значения горизонтальной и вертикальной составляющих перемещений чаши. В процессе натурных экспериментов для оценки фактических значений виброперемещений использовался измеритель вибрации МЕГЕОН 09631 (3). Оценка скорости движения деталей по направляющим вибробункера производилась с применением нанесенной на чашу шкалы. Время перемещения определялось по видеофрагментам, снятым на видеокамеру (4).

В рамках экспериментальных испытаний на лабораторном стенде были также получены значения скорости детали при различных амплитудных значениях возмущающего воздействия, задаваемых путем изменения амплитуды питающего переменного напряжения. Во всех вычислительных и натурных экспериментах частота возмущающего воздействия была постоянной (50 Гц), также был неизменным угол наклона направляющей чаши вибробункера ($\beta = 1,84^\circ$).

Фактически вибробункер имеет достаточно сложную систему подвеса, с механическими ограничителями, нелинейными пружинами и т.д., поэтому настройка параметров виброперемещения осуществлялась путем подбора ам-

плитуды питающего напряжения на электромагнитах, отвечающих за горизонтальную амплитуду. При этом увеличение горизонтальной амплитуды приводило к снижению вертикальных перемещений чаши, что объясняется особенностью конструкции вибробункера.

В качестве перемещаемых деталей в экспериментах использовались шестигранные гайки (ГОСТ 5915-70) М8, М10 и М14. Скорость движения деталей оценивалась как отношение расстояния между метками на бункере ко времени перемещения между ними. В табл.1. показаны полученные значения скорости деталей в зависимости от параметров вибрации, полученные в ходе вычислительных и натурных экспериментов.

Таблица 1. Зависимости скорости детали от амплитуд вибрации

Table 1. The dependence component speed on vibration amplitudes

Масса детали $m = 5.55$ г (гайка М8) / Detail mass $m = 5.55$ g (M8 nut)					
A_x , мм / A_x , mm	A_y , мм / A_y , mm	Суммарная амплитуда, A / Total ampli- tude, A	$\dot{x}$ мо- дель, мм/с / $\dot{x}$ model, mm/s	$\dot{x}$ стенд, мм/с / $\dot{x}$ model, mm/s	Относительная погрешность / Relative error
0.95	0.05	0,96	-50.5	-58.2	13%
0.9	0.2	0,92	35.3	28.6	23%
0.85	0.38	0,94	30.9	27.8	11%
0.8	0.49	0,94	27.1	23.8	14%
0.75	0.6	0,96	21.6	20.1	7%
Масса детали $m = 10.2$ г (гайка М10) / Detail mass $m = 10.2$ g (M10 nut)					
0.95	0.05	0,96	-50.5	-48.7	3%
0.9	0.2	0,92	35.3	40.0	11%
0.85	0.38	0,94	30.9	34.5	10%
0.8	0.49	0,94	27.1	28.6	5%
0.75	0.6	0,96	21.6	24.5	12%

Окончание табл. 2 / Table 2 (ending)

A_x , мм / A_x , mm	A_y , мм / A_y , mm	Суммарная амплитуда, A / Total ampli- tude, A	$\dot{x}$ мо- дель, мм/с / $\dot{x}$ model, mm/s	$\dot{x}$ станд, мм/с / $\dot{x}$ model, mm/s	Относительная погрешность / Relative error
Масса детали $m = 37.6$ г (гайка M14) / Detail mass $m = 37.6$ g (M14 nut)					
0.95	0.05	0,96	-50.5	-51.2	1%
0.9	0.2	0,92	35.3	32.3	9%
0.85	0.38	0,94	30.9	27.0	14%
0.8	0.49	0,94	27.1	23.8	14%
0.75	0.6	0,96	21.6	19.1	13%

Как можно видеть из табл. 1. экспериментально полученные значения скоростей имеют значительный разброс для разных масс деталей. Некоторые значения отличаются почти в два раза, хотя из математической модели, очевидно, что скорость движения деталей не должна зависеть от массы. Такой эффект объясняется в том числе неоднородностью поверхности направляющих чаши бункера, не обеспечением безотрывного движения деталей, малым количеством отдельных экспериментов и в меньшей степени погрешностью измерений, как амплитуд, так и скоростей движения деталей. Сравнение средних значений скоростей перемещения деталей разной массы с результатами математического моделирования показало, что максимальная относительная ошибка составит 4,9%, при этом средняя ошибка по всем экспериментам составит 2,2%. Модель адекватно описывает процесс движения частиц вниз по чаше, при низких значениях вертикальной ампли-

туды, а характер зависимостей скорости от вертикальной и горизонтальной амплитуды отражены корректно.

Выводы

В результате исследований была разработана математическая модель движения частицы по направляющим чаши бункера под действием вибрации. Для апробации модели был выполнен комплекс натурных испытаний на исследовательском стенде, включающем вибропитатель, блок управления и измерительную систему. В ходе численного моделирования виброперемещения деталей с параметрами возмущающего воздействия, определенных в ходе экспериментов, были установлены допустимые скорости движения деталей для различных режимов работы. Сравнительный анализ результатов вычислительных и натурных экспериментов показал качественную сходимость и среднюю погрешность 2.2%. Таким образом, разработанная в рамках исследования математическая

модель вибротранспортирования деталей
может быть использована при проекти-

ровании и настройке вибропитателей в
составе автоматизированных линий.

Список литературы

1. Автоматизация технологической подготовки производства профильных валов / С. Г. Емельянов, А. О. Гладышкин, М. С. Разумов, С. Ф. Яцун // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №. 1-1. С. 164-168.
2. Преображенский Ю. П. Некоторые проблемы автоматизации процессов // Техника и технологии: пути инновационного развития. Курск, 2019. С. 62-64.
3. Modeling of human-machine interaction in an industrial exoskeleton control system / S. Jatsun, A. Malchikov, O. Loktionova, A. Yatsun // Interactive Collaborative Robotics: 5th International Conference, ICR 2020, St Petersburg, Russia, October 7-9, 2020, Proceedings 5. Springer International Publishing, 2020. P. 116-125.
4. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Automatization of manual labor by using an industrial exoskeleton // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE, 2020. P. 470-475.
5. Яцун С.Ф., Мальчиков А.В., Кочергин О.Б. Метод определения ориентации контакт-детали при автоматизации технологического процесса пайки // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(3): 8-20. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-8-20>.
6. Локтионова О. Г. Синтез оптимальных параметров вибрационного транспортирующего устройства сыпучих материалов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2006. №. 9. С. 46-50.
7. Афанасьев А. и др. Определение рациональных параметров линейного электромагнитного двигателя для вибропитателя-грохота // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2015. №. 8. С. 81-89.
8. Общие положения по работе ВБЗУ. URL: <https://studfile.net/preview/6219169/page:5/>
9. Сельвинский В. В. Вибрационное перемещение в процессах транспортирования // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2016. №. 75. С. 10-15.
10. Лушников Б. В. Компьютерное моделирование динамики элемента сухого некулонова трения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. №. 1-2. С. 439-444.
11. Лушников Б. В. Испытательный стенд для идентификации динамических параметров сухого некулонова трения // Фундаментальные исследования. 2012. №. 3-3. С. 638-641.

12. А.с. 1527559, МКИ G01N 19/02, А1. Способ определения силы сухого трения и коэффициента вязкого трения в колебательной системе / С. Л. Цыфанский, Б. В. Лушников, М. А. Магоне. (СССР). №4406068/25-28 ; заявлено 07.04.88 ; опубл. 07.12.89, Бюл. № 45. 3 с.
13. Патент на полезную модель RU 44014 U1, Электромагнитный двигатель / Рукавицын А.Н., № 2004128139/22 ; заявлено 21.09.2004 ; опубл. 10.02.2005, Бюл. № 4. 4 с.
14. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Investigation of the mechatronic system oscillatory motion with discrete feedback PD-control //Vibroengineering Procedia. 2016. Vol. 8. P. 225-230.
15. Богуславский Э. И., Усыпко А. С. Оптимизация области применения и организации работы доставочного оборудования в условиях Расвумчоррского рудника ОАО «Апатит» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2004. №. 12. С. 188-191.
16. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Adaptive Control System for DC Electric Drive under Uncertainty // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2020. P. 1-5.
17. Control features of the electromechanical system with end-effector considering the regulated torque / A. Malchikov, A. Yatsun, P. Bezmen, O. Tarasov // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2017. Vol. 113. P. 02001.
18. Лупехина И. В., Безмен П. А., Яцун С. Ф. Плоскопараллельное движение вибрационного робота по горизонтальной шероховатой поверхности // Естественные и технические науки. 2012. №. 4. С. 41-44.
19. Безмен П. А., Яцун С. Ф. Исследование движения вибрационного мобильного робота с электромеханическим приводом внутренней подвижной массы // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2009. №. 2. С. 49-61.
20. Дырда В. И. и др. Динамика вибропитателей с нелинейной упругой характеристикой // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2017. №. 2 (68). С. 131-139.

References

1. Emelyanov, S.G., Gladyshevskiy, A.O., Razumov, M.S., Jatsun, S.F. Automation Technological Preparation of Manufacture Profile Shaft. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 1-1, pp. 164-168.
2. Preobrazhensky Yu. P. [Some problems of process automation]. *Tekhnika i tekhnologii: puti innovatsionnogo razvitiya* [Technology and technology: ways of innovative development]. Kursk, 2019, pp. 62-64 (In Russ.).

3. Jatsun S., Malchikov A., Loktionova O., Yatsun A. Modeling of human-machine interaction in an industrial exoskeleton control system. *Interactive Collaborative Robotics: 5th International Conference, ICR 2020, Proceedings 5*. Springer International Publishing, St. Petersburg 2020. pp. 116-125.
4. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Automatization of manual labor by using an industrial exoskeleton. *2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. IEEE, 2020. pp. 470-475.
5. Yatsun S. F., Mal'chikov A. V., Kochergin O.B. Method for Orientation Determining of the Detail for the Automated Soldering Technological Process. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(3): 8-20 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-8-20>.
6. Loktionova O.G. Sintez optimal'nykh parametrov vibratsionnogo transportiruyushchego ustroystva sypuchikh materialov [Synthesis of optimal parameters of a vibrating conveying device of bulk materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = News of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering*. 2006. no. 9, pp. 46-50.
7. Afanasyev A. et al. Opredelenie ratsional'nykh parametrov lineinogo elektromagnitnogo dvigatelya dlya vibropitatatelya-grokhota [Determination of rational parameters of a linear electromagnetic motor for a vibrating screen feeder]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of Higher Educational Institutions. Mining Magazine*, 2015, no. 8, pp. 81-89.
8. Obshchie polozheniya po rabote VBZU [General provisions on the work of the VBZU]. Available at: <https://studfile.net/preview/6219169/page:5/>.
9. Selvinsky V.V. Vibratsionnoe peremeshchenie v protsessakh transportirovaniya [Vibrational displacement in transportation processes]. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i ekonomicheskie nauki = Bulletin of the Amur State University. Series: Natural and Economic Sciences*, 2016, no. 75, pp. 10-15.
10. Lushnikov B.V. Komp'yuternoe modelirovanie dinamiki elementa sukhogo nekulonova treniya [Computer simulation of dynamics of dry non-coulomb friction element]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2010, vol. 12, no. 1-2, pp. 439-444.
11. Lushnikov B.V. Ispytatel'nyi stend dlya identifikatsii dinamicheskikh parametrov sukhogo nekulonova treniya [Test bench for identification of dynamic parameters of dry non-coulomb friction]. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2012, no. 3-3, pp. 638-641.
12. A.s. 1527559, MKI G01N 19/02, A1. *Sposob opredeleniya sily sukhogo treniya i koeffitsienta vyazkogo treniya v kolebatel'noi sisteme* [Method for determining the force of

dry friction and the coefficient of viscous friction in an oscillatory system]. S. L. Tsyfansky, B. V. Lushnikov, M. A. Magone. (THE USSR). No. 4406068/25-28; declared 04/07/88; publ. 07.12.89, Bulletin. No. 45. 3 p.

13. Patent RU 44014 U1, Elektromagnitnyi dvigatel' [Electromagnetic motor]. Rukavitsyn A.N. No: 2004128139/22; declared 09/21/2004; publ. 02/10/2005, Bulletin. No. 4. 4 p.

14. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Investigation of the mechatronic system oscillatory motion with discrete feedback PD-control. *Vibroengineering Procedia*, 2016, vol. 8, pp. 225-230.

15. Boguslavsky E. I., Usypko A. S. Optimizatsiya oblasti primeneniya i organizatsii raboty dostavochnogo oborudovaniya v usloviyakh Rasvumchorrskogo rudnika OAO «Apatit» [Optimization of the scope and organization of operation of delivery equipment in the conditions of the Rasvumchorrsky mine of OJSC Apatit]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2004, no. 12, pp. 188-191.

16. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Adaptive Control System for DC Electric Drive under Uncertainty // *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. IEEE, 2020, C. 1-5.

17. Malchikov A., Yatsun A., Bezmen P., Tarasov O. Control features of the electromechanical system with end-effector considering the regulated torque. *MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences*, 2017, vol. 113, 02001 p.

18. Lupekhina I.V., Bezmen P.A., Yatsun S.F. Ploskoparallel'noe dvizhenie vibratsionnogo robota po gorizontal'noi sherokhovatoi poverkhnosti [Plane-parallel motion of a vibrating robot on a horizontal rough surface]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Natural and Technical Sciences*, 2012, no. 4, pp. 41-44.

19. Bezmen P. A., Yatsun S. F. Issledovanie dvizheniya vibratsionnogo mobil'nogo robota s elektromekhanicheskim privodom vnutrennei podvizhnoi massy [Investigation of the motion of a vibrating mobile robot with an electromechanical drive of an internal moving mass] . *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii = Izvestia of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering. Mashinostroenie*, 2009, no. 2, pp. 49-61.

20. Dyrda V.I. et al. Dinamika vibropitatelei s nelineinoi uprugoi kharakteristikoi [Dynamics of vibratory feeders with nonlinear elastic characteristics]. *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta = Science and Progress of Transport. Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport*, 2017, no. 2 (68) pp. 131-139.

Информация об авторах / Information about the Authors

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

Емельянова Оксана Викторовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: oks-emelyanova@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6067-3114>

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>

Марченко Виктор Васильевич, магистрант кафедры механики мехатроники и робототехники Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vick.mar4encko2017@yandex.ru

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

Oksana V. Emelyanova, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zveroknnp@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2902-1721>

Evgeniy N. Politov, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: 5-storm-7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0597-8505>

Viktor V. Marchenko, Master Student, Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vick.mar4encko2017@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-111-127>

Моделирование испытательного стенда конструктивных элементов органов управления самолета

С.Ф. Яцун¹, А.В. Мальчиков¹ ✉, А.С. Яцун¹, Е.В. Субботин¹

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

✉ e-mail: zveroknp@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Повышение эффективности функционирования испытательных стендов конструктивных элементов органов управления самолета за счет учета динамических особенностей электромеханической системы, исследуемых с применением математической модели, учитывающей особенности аппаратной реализации приводной и измерительной систем стенда.

Задачи. Разработка математической модели приводной системы исполнительного звена испытательного стенда, получение динамических характеристик управляемого движения электромеханической системы стенда и поворотного переключателя из состава органов управления экипажа самолета.

Методы. Для решения поставленных задач использовались методы математического моделирования динамических систем, теории управления и теории механизмов и машин. При создании программных продуктов использованы математические пакеты Matlab/Simulink. Для оценки влияния свойств упругой муфты на динамику движения исполнительного звена использовались квадратичная ошибка по положению и скорости, а также их интегральные значения.

Результаты. В ходе исследования была разработана математическая модель испытательного стенда, включающая приводную и измерительную системы, устройство сопряжения и объект тестируемого оборудования. В процессе вычислительных экспериментов были установлены предельные значения крутящего момента и скорости вращения исполнительного звена, а также выполнен анализ влияния параметров упруго-вязких свойств элементов сопряжения на движение поворотного переключателя.

Заключение. В работе установлено, что импульсный характер изменения крутящего момента оказывает влияние на движение исполнительного звена стенда. Для снижения эффекта предложено использовать вязкоупругий элемент сопряжения, который позволяет снизить колебательность исполнительного звена стенда с сохранением высокой точности движения.

Ключевые слова: математическое моделирование; испытательные стенды; авиационное оборудование; шаговый двигатель.

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: Моделирование испытательного стенда конструктивных элементов органов управления самолета / С.Ф. Яцун, А.В. Мальчиков, А.С. Яцун, Е.В. Субботин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(3): 111-127. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-111-127>.

Поступила в редакцию 05.08.2023

Подписана в печать 20.09.2023

Опубликована 28.10.2023

© Яцун С.Ф., Мальчиков А.В., Яцун А.С., Субботин Е.В., 2023

Simulation of the Test Bench of Structural Elements of Aircraft Controls

Sergey F. Yatsun ¹, Andrey V. Mal'chikov ¹ ✉, Andrei S. Yatsun ¹,
Evgeniy V. Subbotin ¹

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

✉ e-mail: zveroknnp@gmail.com

Abstract

Purpose of research. Improving the efficiency of the test benches of the structural elements of the aircraft controls, by taking into account the dynamic features of the electromechanical system, studied using a mathematical model that takes into account the features of the hardware implementation of the drive and measuring systems of the stand.

Tasks. Development of a mathematical model of the drive system of the executive link of the test bench, obtaining dynamic characteristics of the controlled movement of the electromechanical system of the stand and the rotary switch from the aircraft crew controls.

Methods. Methods of mathematical modeling of dynamic systems, control theory and theory of mechanisms and machines were used to solve the tasks. When creating software products, Matlab/Simulink mathematical packages were used. To assess the influence of the properties of the elastic coupling on the dynamics of the movement of the executive link, the quadratic error in position and speed, as well as their integral values, were used.

Results. In the course of the research, a mathematical model of the test bench was developed, including the drive and measuring systems, the interface device and the object of the tested equipment. In the course of computational experiments, the maximum values of the torque and the rotational speed of the executive link were established, and the influence of the parameters of the elastic-viscous properties of the interface elements on the movement of the rotary switch was analyzed.

Conclusion. It is established in the work that the pulsed nature of the torque change affects the movement of the executive link of the stand. To reduce the effect, it is proposed to use a viscoelastic coupling element, which reduces the oscillation of the executive link of the stand while maintaining high accuracy of movement.

Keywords: mathematical modeling; test benches; aviation equipment; stepper motor.

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

Financing: The work is supported by the program "Priority 2030".

For citation: Yatsun S. F., Mal'chikov A. V., Yatsun A. S., Subbotin E. V. Simulation of the Test Bench of Structural Elements of Aircraft Controls. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(3): 111-127 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-111-127>.

Received 05.08.2023

Accepted 20.09.2023

Published 28.10.2023

Введение

При разработке и настройке авиационного оборудования важнейшим этапом является процедура сертификации, устанавливающая соответствие воздушного судна и его систем требованиям норм летной годности [1-3]. При этом сегодня акцент с контроля готовой продукции смещается в сторону контроля и управления процессами ее создания. На основе во многом зарубежного опыта сегодня активно внедряется принцип «сквозной» сертификации при проектировании воздушных судов, предполагающий промежуточный контроль составных частей и комплектующих авиационной продукции, при участии в ней всех специалистов, занятых в полном жизненном цикле авиационной продукции [1, 2].

При испытаниях бортовых систем воздушных судов применяется специализированное оборудование, позволяющее осуществлять калибровочные ресурсные и поверочные испытания в различных режимах и внешних условиях [4-5]. Особенностью электромеханических систем испытательных стендов является высокая точность и повторяемость движения их исполнительных звеньев в широком диапазоне внешних условий, значительный запас прочности и стойкости к воздействию различных факторов, позволяющих сохранять требуемые эксплуатационные характеристики в течение длительного времени.

Для обеспечения высокой точности и надежности стендов, при проектировании необходим учет не только условий эксплуатации, но и влияния особенностей функционирования электромеханических систем оборудования на результаты измерений. Одним из путей повышения качества и темпов разработки является использование математического имитационного моделирования, позволяющего определить требуемые электромеханические параметры системы, выполнить оценку точности проектируемой системы.

В работе рассматривается электромеханическая система испытательного стенда для автоматизированной настройки и тестирования конструктивных элементов из состава органов управления экипажа самолета. В задачи испытательного стенда входит определение соответствия авиационного оборудования требуемым техническим характеристикам, выявление брака и установление численных значений перемещений и усилий, характеризующих его работу. Импульсный характер изменения крутящего момента, формируемого шаговым двигателем, используемым в стенде, упруго-диссипативные свойства измерителя и исполнительно звена стенда, сопрягаемого с тестируемым авиационным оборудованием, оказывают непосредственное влияние на результаты измерений. Таким образом, испытательный стенд, рассматриваемый в работе,

представляет собой сложное мехатронное устройство, учет динамики движения исполнительных звеньев которого необходим на всех этапах разработки и внедрения. Одним из эффективных путей решения данной задачи является использование математического моделирования, позволяющего определить требуемые параметры устройства, а также установить закономерности, характеризующие динамику управляемого движения электромеханической системы испытательного стенда [6-8].

Целью работы является повышение эффективности функционирования испытательных стендов конструктивных элементов органов управления самолета,

за счет учета динамических особенностей электромеханической системы, исследуемых с применением математической модели, учитывающей особенности аппаратной реализации измерительной системы стенда.

Материалы и методы

В работе рассматривается испытательный стенд для определения технических характеристик поворотного переключателя (ПП), и определения соответствия параметров требованиям технической документации на устройство. Проектный облик испытательного стенда с установленным ПП показан на рис.1.

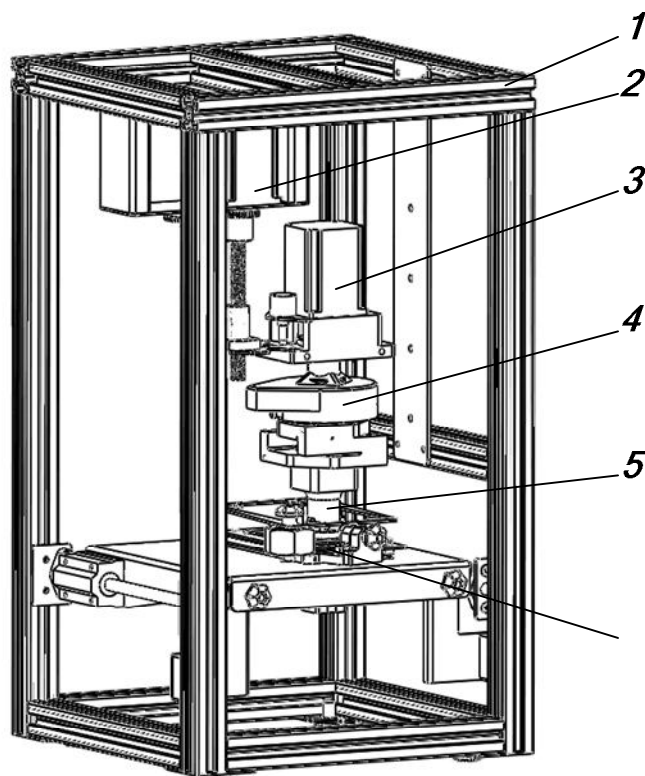


Рис. 1. Проектный облик испытательного стенда: 1 – несущая рама; 2 – привод вертикальной подачи; 3 – поворотный привод; 4 – измерительная система; 5 – элементы сопряжения стенда с исполнительным звеном переключателя; 6 – поворотный переключатель (ПП)

Fig. 1. Design of the test bench: 1 – supporting frame; 2 – vertical feed drive; 3 – rotary drive; 4 – measuring system; 5 – elements of interface of the stand with the switch executive link; 6 – rotary switch

Принцип работы заключается в следующем: перед началом испытаний испытуемый ПП фиксируется в стенде с помощью специализированных креплений; затем с помощью элементов сопряжения стыкуется с приводной системой; далее оператор задает параметры и инициализирует необходимый тип испытаний. После выполнения комплекса движений измерений стенд формирует отчет о результатах испытаний.

В данном случае приводная система включает два шаговых привода, отвечающих за нажатие и поворот рукоятки переключателя. Стенд содержит

двухкоординатный измеритель, определяющий параметры нагружения исполнительного звена переключателя в процессе испытаний. Вертикальный привод реализован с использованием шариковинтовой передачи, а поворот переключателя реализуется за счет непосредственного движения вала шагового двигателя, крутящий момент на рукоятку при этом передается посредством упругих элементов сопряжения.

Рассмотрим более подробно движение и модель поворотного привода, для чего перейдем к схеме с одним шаговым двигателем (рис. 2).

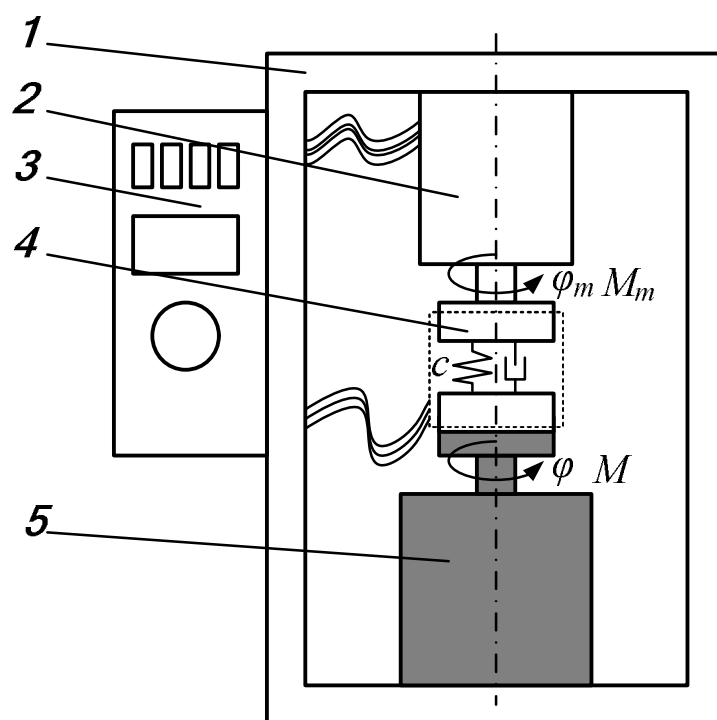


Рис. 2. Схема поворотного привода испытательного стенда: 1 – рама стенда; 2 – поворотный привод; 3 – блок управления; 4 – элементы сопряжения стенда; 5 – поворотный переключатель

Fig. 2. The scheme of the rotary drive of the test bench: 1 – frame of the stand; 2 – rotary actuator; 3 – control unit; 4 – interface elements of the stand; 5 – rotary switch

Согласно схеме: привод станда, сопряженный с ПП посредством упруго-вязкого элемента, может быть описан следующей системой дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} J\ddot{\varphi} = c(\varphi - \varphi_m) + b(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_m) - M_c \\ J_m\ddot{\varphi}_m = M_m - c(\varphi - \varphi_m) - b(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_m), \end{cases} \quad (1)$$

где J , J_m – приведенные моменты инерции на валу переключателя и двигателя соответственно; c , b – коэффициенты упругости и вязкости элемента сопряжения станда и переключателя; M_c –

момент сопротивления ПП; M_m – крутящий момент шагового двигателя.

Важнейшим компонентом представленной системы является гибридный шаговый двигатель, который содержит две одинаковые обмотки А и В и гибридный зубчатый ротор (рис.3, б). Далее по тексту, значения напряжений питания, ЭДС, токов и т.д. для соответствующих обмоток обозначим индексами а и б.

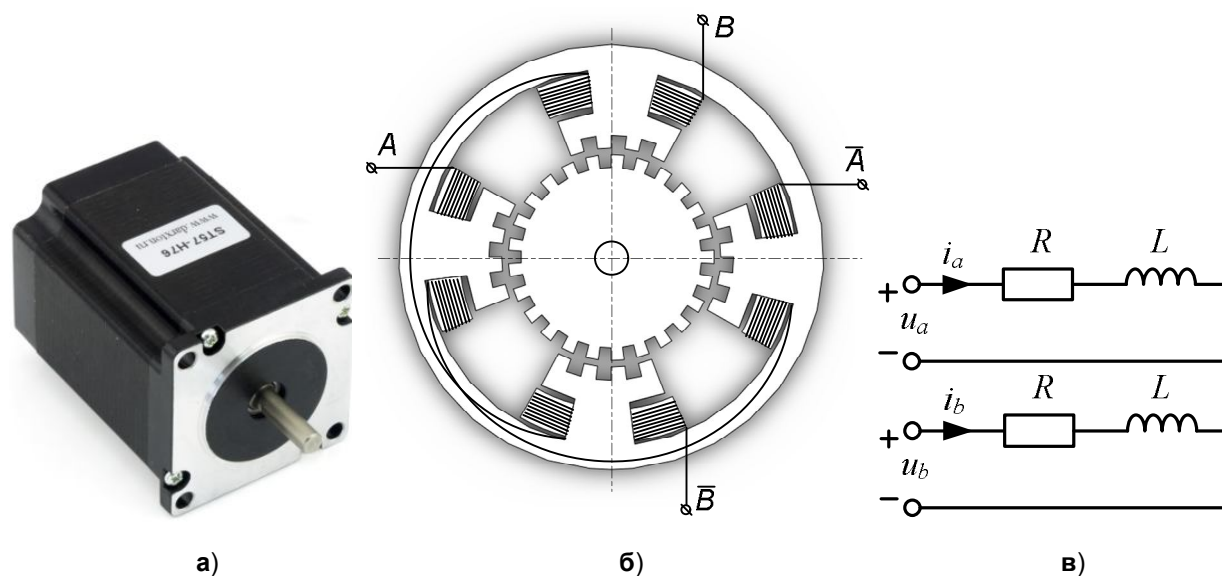


Рис. 3. Гибридный ШД NEMA23 (FL57STH76-2804A)

Fig. 3. Hybrid stepper motor NEMA23 (FL57STH76-2804A)

Согласно второму закону Кирхгофа для обмоток шагового двигателя (рис.3, в) справедливы выражения для производной от силы тока на каждой обмотке [9]:

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = (u_a - Ri_a - e_a)/L \\ \frac{di_b}{dt} = (u_b - Ri_b - e_b)/L, \end{cases} \quad (2)$$

где i_a , i_b – токи на обмотках; u_a , u_b – питающие напряжения от системы управления; R , L – активное сопротивление и

индуктивность; e_a и e_b – противоЭДС, обусловленное влиянием магнитного поля ротора при вращении.

ПротивоЭДС определяются следующим образом [9]:

$$\begin{cases} e_a = -k_m \dot{\varphi}_m \sin(N_r \varphi_m) \\ e_b = -k_m \dot{\varphi}_m \sin(N_r(\varphi_m - \lambda)), \end{cases} \quad (3)$$

где φ_m – угол поворота ротора двигателя; N_r – количество зубьев на каждом из

двух полюсов ротора; λ – угол между полюсами обмоток статора (для рассматриваемого двигателя $\lambda = \pi/2$); k_m – моментный коэффициент, зависящий от конструкции ротора и величины максимального потокоцепления, создаваемого его постоянным магнитом.

Электромагнитный крутящий момент, создаваемый двигателем, будет иметь следующий вид [9]:

$$M_m = k_m [-i_a \sin(N_r \varphi_m) + i_b \cos(N_r \varphi_m)] - M_d \sin(4N_r \varphi_m), \quad (4)$$

где M_d – амплитуда фиксирующего момента, обусловленного взаимодействием магнитного поля ротора с сердечниками статорных обмоток (в рамках данной работы примем $M_d = 0$).

В отличие от коллекторных двигателей постоянного тока, напряжения, прикладываемые к обмоткам ШД, должны иметь импульсный характер, каждое переключение которых приводит к дискретному перемещению вала двигателя. В рамках настоящей работы будем рассматривать полношаговый режим работы гибридного шагового двигателя, при котором одновременно задействованы обе статорные обмотки. Таким образом, питающие напряжения u_a , u_b формируются системой управления программно.

Поворотный переключатель, рассматриваемый в работе, конструктивно выполнен таким образом, что при угле поворота на угол значением $\pm 30^\circ$ ощущается проходной упор для тактильной индикации пилоту. При этом величина сопротивления при прохождении через проходной упор составляет примерно 0,5 Нм. Таким образом, нелинейный момент сопротивления поворотного переключателя может быть описан кусочно-гармонической функцией следующего вида:

$$M_c = |M_{\max} \sin(k_{Mc} \varphi)| \text{sign}(\dot{\varphi}) + M_{fr}, \quad (5)$$

где $M_{\max}$ – максимальная амплитуда момента сопротивления проходного упора; M_{fr} – момент силы трения; k_{Mc} – коэффициент угловой частоты (для рассматриваемого примера $k_{Mc} = 0.1047$).

Зависимость момента сопротивления (без учета момента трения) от угла поворота переключателя может быть представлена временной диаграммой, показанной на рис.4.

Итоговая математическая модель, описывающая динамику управляемого движения исполнительного звена привода испытательного стенда, сопряженного с рукояткой поворотного переключателя, на основании (1), (2), (3), (4) и (5) будет иметь вид:

$$\begin{cases} J\ddot{\varphi} = c(\varphi - \varphi_m) + b(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_m) - |M_{\max} \sin(k\varphi)| \text{sign}(\dot{\varphi}) - M_{fr} \\ J_m \ddot{\varphi}_m = k_m [-i_a \sin(N_r \varphi_m) + i_b \cos(N_r \varphi_m)] - c(\varphi - \varphi_m) - b(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_m) \\ L \frac{di_a}{dt} = u_a - Ri_a - k_m \dot{\varphi}_m \sin(N_r \varphi_m) \\ L \frac{di_b}{dt} = u_b - Ri_b + k_m \dot{\varphi}_m \cos(N_r \varphi_m). \end{cases} \quad (6)$$

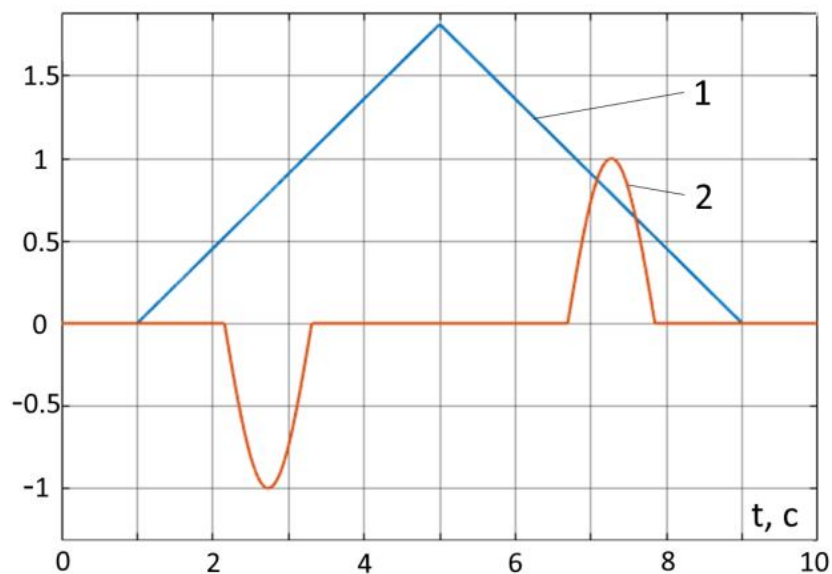


Рис. 4. Временные диаграммы модели нагружения стенда: **1** – угол поворота ПП φ (рад);
2 – момент сопротивления M_c (Нм)

Fig. 4. Time diagrams of the bench loading model: **1** – angle of rotation of the rotary switch φ ,
2 – resistance torque M_c

Момент силы трения может быть определен согласно нелинейной модели, представленной в работах [9-10]. Для получения численного решения была разработана модель в среде Matlab/Simulink [11-12].

Результаты и их обсуждение

В ходе моделирования испытательного стенда, предлагается решить ряд задач, позволяющих установить предельные значения параметров системы управления, а также оценить влияние импульсного характера изменения крутящего момента, создаваемого двигателем, на динамику ПП при использовании переходного звена сопряжения с различными упруго-вязкими свойствами.

Так как согласно механической характеристике двигателя с увеличением

частоты вращения двигателя крутящий момент падает, то в ходе моделирования одной из задач является определение максимально допустимой скорости поворота рукоятки ПП без потери синхронизма шагового двигателя при номинальных параметрах момента сопротивления. В ходе моделирования также предлагается установить предельно допустимый момент сопротивления ПП при номинальной скорости вращения двигателя.

Основные параметры математической модели показаны в табл.1.

С целью определения предельного крутящего момента для привода испытательного стенда покажем результаты моделирования (рис. 5) при линейно растущем моменте сопротивления

$$M_c(t) = -k_{MS}t. (k_{MS} = 1.0).$$

Таблица 1. Параметры модели

Table 1. Model parameters

Наименование параметра / Parameter name	Обозначение / Designation	Значение / Value
Момент инерции исполнительного звена стенда	J	0,005 кгм ²
Жесткость упругой муфты	c	40 Нм/рад
Вязкость упругой муфты	b	0.2 Нмс/рад
Номинальное напряжение	U_n	3.2 В
Моментный коэффициент	k_m	0.66 Нм/А
Количество шагов ШД	N	200
Активное сопротивление обмотки	R	1.13 Ом
Индуктивность обмотки	L	3.6 мГн
Момент инерции ШД	J_m	$45 \cdot 10^{-5}$ кгм ²

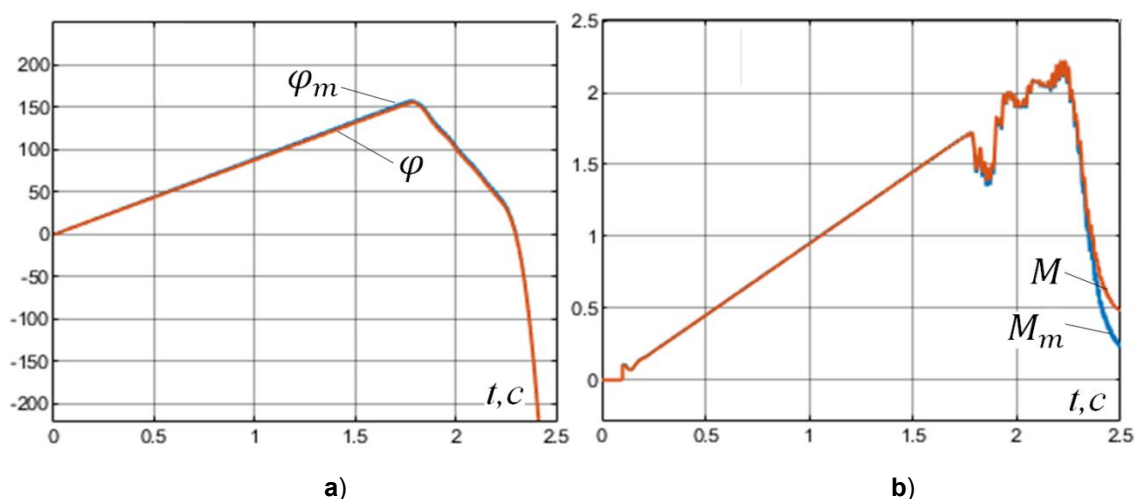


Рис. 5. Численное моделирование потери синхронизма ШД под действием момента сопротивления M_c : **a** – временные диаграммы углов поворота двигателя φ_m° , и переключателя φ° ; **b** – временные диаграммы крутящего момента на двигателе M_m (Нм), на переключателе M (Нм)

Fig. 5. Numerical simulation of the loss of synchronism of the stepper motor under the action of the moment of resistance M_c : **a** – time diagrams of the rotation angles of the motor φ_m° , and rotary switch φ° ; **b** – time diagrams of the motor torque M_m (Nm), switch torque M (Nm)

Как показали результаты численного моделирования при нагружении привода стенда моментом сопротивления 1.72 Нм, шаговый двигатель теряет синхронизм на 1.78 с.

С целью определения предельной скорости вращения при номинальном значении момента сопротивления ($M_c=0,5$ Нм), покажем результаты моделирования (рис. 6) при линейно растущей скорости вращения ШД $\dot{\varphi}^*(t)=k_\omega t$. ($k_\omega=0,356$ об/с).

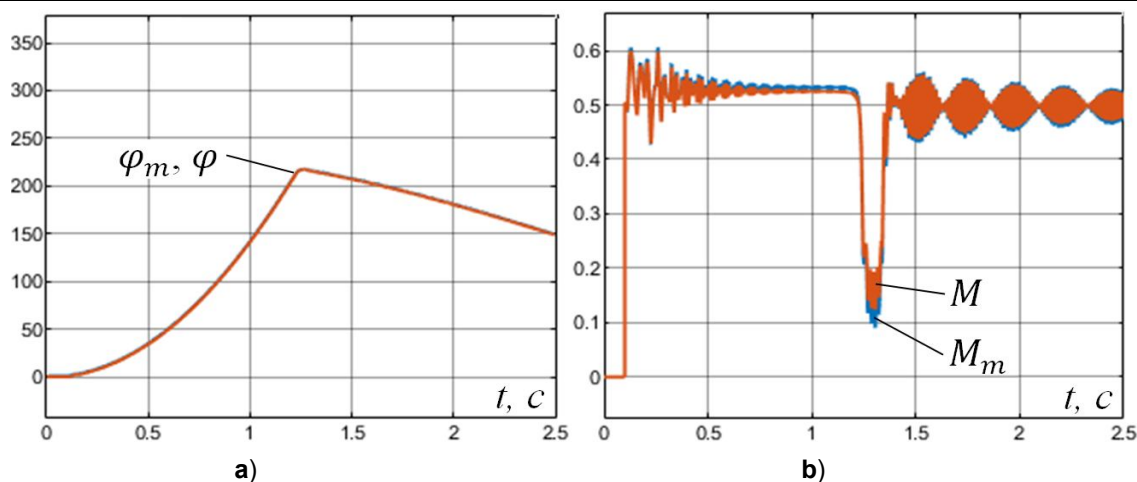


Рис. 6. Численное моделирование потери синхронизма ШД при превышении скорости:

a – временные диаграммы углов поворота двигателя φ_m° , и переключателя φ° ;

b – временные диаграммы крутящего момента на двигателе M_m (Нм), на переключателе M (Нм)

Fig. 6. Numerical simulation of the loss of synchronism of the stepper motor when exceeding the speed: **a** – time diagrams of the rotation angles of the motor φ_m° , and rotary switch φ° ;

b – time diagrams of the motor torque M_m (Nm), switch torque M (Nm)

В ходе моделирования было установлено, что предельная скорость, с которой может осуществляться поворот переключателя с типовой нагрузочной характеристикой ($M_c = 0,5$ Нм), составляет 218 шагов в секунду или 65,4 об/мин.

Наибольший интерес представляет влияние упругих свойств элементов сопряжения приводной системы станда и исполнительного звена ПП на движение с нелинейным моментом сопротивления. Покажем результаты в виде временных диаграмм.

Как показали результаты моделирования, показанные на рис. 7, вязкоупругий элемент «смягчает» переходные процессы в приводной системе, и при указанных параметрах системы ошибка позиционирования не превышает $0,2^\circ$ или менее 0.23% (при жесткости $c = 40$).

Оценку влияния импульсного характера изменения крутящего момента,

создаваемого двигателем, на динамику поворотного выключателя при использовании переходного звена сопряжения с упруго-вязкими свойствами будем производить по величине квадрата ошибки, определяемой согласно:

$$E_\varphi = (\varphi^* - \varphi)^2, \quad (7)$$

где φ^* – желаемый угол поворота исполнительного звена ПП; φ – фактический угол поворота.

Колебательную составляющую движения будем оценивать интегралом квадратичной ошибки скорости, определяемой согласно:

$$E_\omega = (\dot{\varphi}^* - \dot{\varphi})^2, \quad (8)$$

где $\dot{\varphi}^*$ – желаемая скорость поворота исполнительного звена ПП; $\dot{\varphi}$ – фактическая скорость.

Покажем временные диаграммы для предложенных критериев различных жесткостей вязкоупругого элемента сопряжения ($c = 20, 40, 100$ Нм/рад).

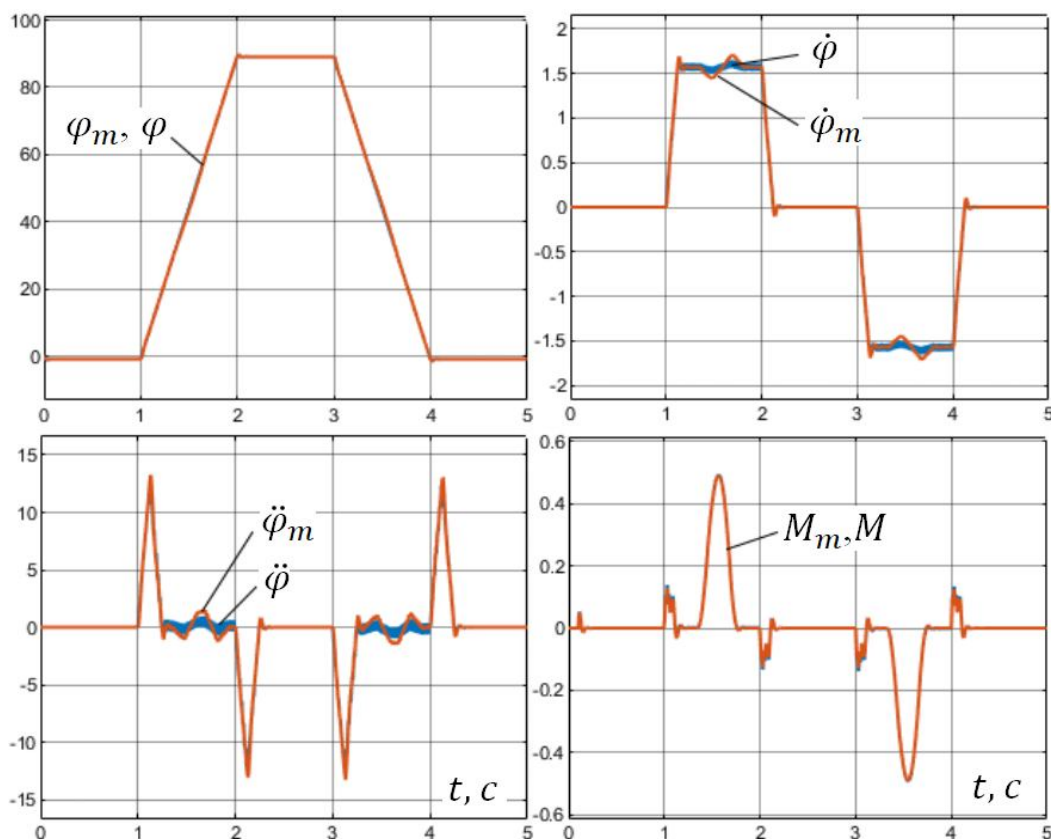


Рис. 7. Моделирование поворота переключателя с нелинейным моментом сопротивления M_c : углы поворота двигателя φ_m° , переключателя φ° , скорости вращения двигателя $\dot{\varphi}_m$ (рад/с), переключателя $\dot{\varphi}$ (рад/с), ускорения двигателя $\ddot{\varphi}_m$ (рад/с²), переключателя $\ddot{\varphi}$ (рад/с²), крутящий момент на двигателе M_m (Нм), на переключателе M (Нм)

Fig. 7. Simulation of the rotation of a switch with a nonlinear moment of resistance M_c : the angles of rotation of the motor φ_m° , the switch φ° , the rotation speed of the motor $\dot{\varphi}_m$ (rad/s), the switch $\dot{\varphi}$ (rad/s), the acceleration of the motor $\ddot{\varphi}_m$ (rad/s²), the switch $\ddot{\varphi}$ (rad/s²), torque on the motor M_m (Nm), on the switch M (Nm)

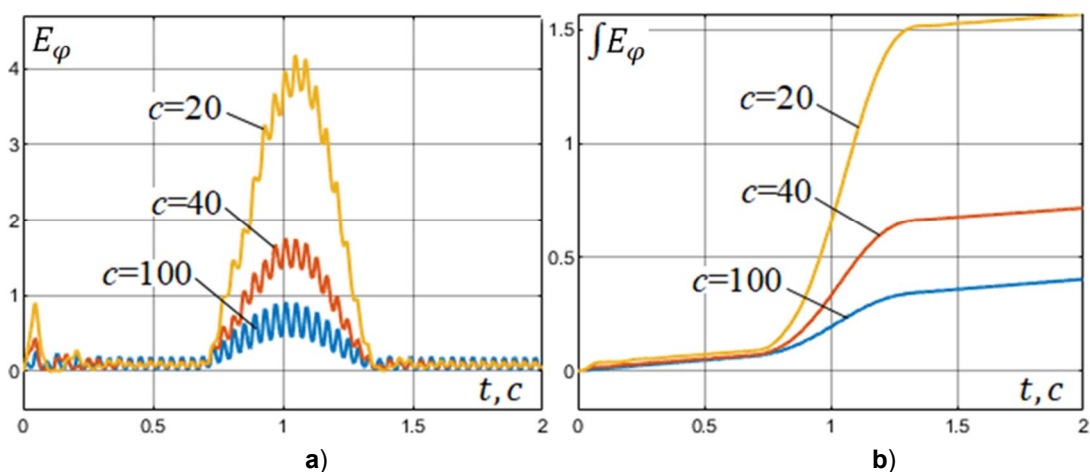


Рис. 8. Временные диаграммы квадратичной ошибки положения E_s (а) и интеграла квадратичной ошибки (б) при повороте ПП с нелинейным моментом сопротивления M_c

Fig. 8. Time diagrams of the square error of the position E_s (a) and the integral of the square error (b) when turning the switch with a nonlinear torque M_c

Как показали результаты моделирования, показанные на рис. 8, снижение жесткости упруго-вязкого элемента сопряжения приводной системы стенда и ПП приводит к повышению величины рассогласования движения выходного звена привода и поворота исполнительного звена переключателя. Интеграль-

ная оценка квадратичной ошибки по углу составляет $\int E_\varphi = 0,4^\circ$ (для $c = 100$), $\int E_\varphi = 0,67^\circ$ (для $c = 40$), $\int E_\varphi = 1,53^\circ$ (для $c = 20$). Таким образом, введение упругого звена снижает общую жесткость системы и приводит к появлению ошибки по положению.

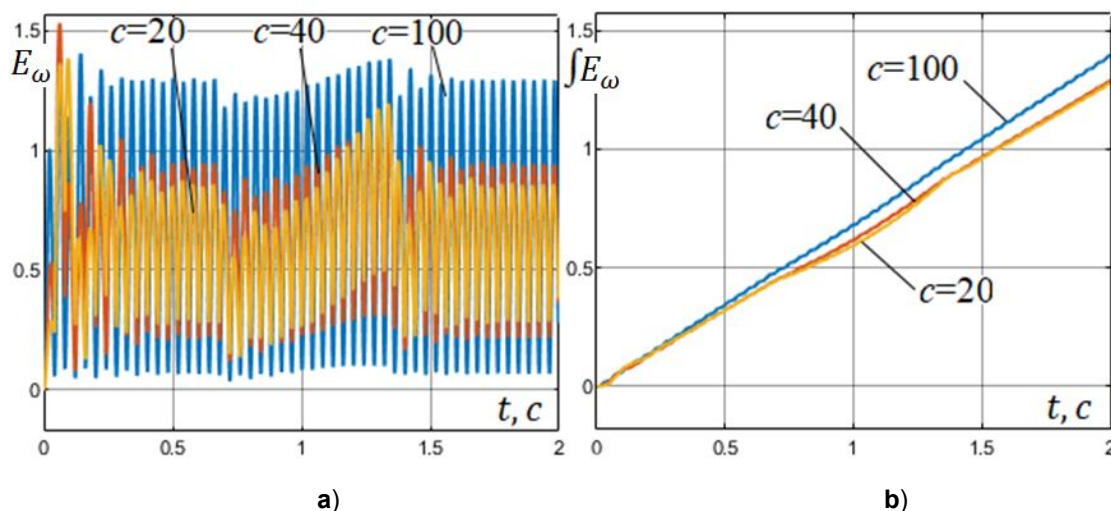


Рис. 9. Временные диаграммы квадратичной ошибки скорости E_ω (а) и интеграла квадратичной ошибки (б) при повороте ПП с нелинейным моментом сопротивления M_c

Fig. 9. Time diagrams of the square velocity error E_ω (а) and the integral of the square velocity error (б) when turning the switch with a nonlinear torque M_c

Анализ графиков ошибки скорости, показанные на рис. 9, говорит о необходимости введения упруго-вязкого элемента для снижения колебательности на исполнительном звене рукоятки. Так со снижением жесткости интегральное значение ошибки по скорости также снижается: $\int E_\omega = 1,4$ рад/с (для $c = 100$), $\int E_\omega = 1,29$ рад/с (для $c = 40$), $\int E_\omega = 1,28$ рад/с (для $c = 20$).

Выводы

С целью повышения эффективности функционирования испытательного стенда поворотного переключателя, яв-

ляющегося конструктивным элементом из состава органов управления экипажа самолета, были разработаны математический аппарат и методика численного моделирования. Разработанная математическая модель позволяет исследовать динамические особенности движения поворотного переключателя под действием крутящего момента приводной системе испытательного стенда. Особенностью модели является учет импульсного характера изменения крутящего момента на выходе шагового двигателя, используемого в оборудовании, моделирование нелинейного момента

сопротивления переключателя обусловлено наличием проходного упора, а также упруго-вязких свойств соединительной муфты, выполняющей роль сопряжения испытательного стенда и тестируемого оборудования.

В ходе моделирования были установлены: предельный момент сопротивления (1.72 Нм) и предельная скорость движения (65,4 об/мин) для приводной системы испытательного стенда. Разработанная модель позволила определить влияние упруго-вязкого элемента сопряжения испытательного стенда на точность движения исполнительного

звена поворотного переключателя. Так увеличение жесткости системы приводит к снижению интегральной квадратичной ошибки (до $0,4^\circ$), однако приводит к увеличению колебательности выражаемой квадратичной ошибкой по скорости. (до 1,4 рад/с). Для выбранных в работе параметров модели, численные расчеты позволили определить рациональные параметры вязкоупругого элемента ($c = 40$ Нм/рад, $b = 0.2$ Нмс/рад), позволяющие снизить интеграл ошибки по скорости до 1,29 рад/с, при сохранении высокой точности по углу поворота $= 0,67^\circ$ (0,74%).

Список литературы

1. Ахметшин Т. Ф. Сертификация авиационной техники // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2014. Т. 18. №. 2 (63). С. 10-18.
2. Александровская Л. Н., Кузнецов А. Г., Солонников Ю. И. Анализ зарубежного опыта сертификации бортовых систем воздушных судов // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 2010. №. 2. С. 36-51.
3. Буряченко А. Г., Ранченко Г. С. Испытательная база и методическое обеспечение испытаний ответственных изделий авиационной техники //Авиационно-космическая техника и технология. 2008. №. 4. С. 75-78.
4. Горбунов В. В., Новиков В. В., Карпеев А. М. Разработка стенда для испытания устройств автономного питания бортовых авиационных аппаратов на основе литий-ионных батарей // Автоматизация и управление в машино-и приборостроении. 2020. С. 14-17.
5. Лапердин А. И., Юркевич В. Д. Разработка адаптивного алгоритма управления стендом прочностных испытаний авиационных конструкций // Автометрия. 2017. Т. 53. №. 4. С. 51-58.
6. Мальчиков А. В., Яцун С. Ф., Яцун А. С. Математическое моделирование копирующего управления робототехническим устройством, оснащенным линейным электроприводом с упругим звеном // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. №. 5. С. 34-42.

7. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Adaptive Control System for DC Electric Drive under Uncertainty // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2020. P. 1-5.
8. Investigation of the dynamical characteristics of the lower-limbs exoskeleton actuators / A. Yatsun, A. Karlov, A. Malchikov, S. Jatsun // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018. Vol. 161. P. 03008.
9. Лушников Б. В., Котельников В. Я., Жакин А. И. Исследование динамики системы с сухим некулоновым трением при фрикционных автоколебаниях // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №. 1-2. С. 27-35.
10. Лушников Б. В. Испытательный стенд для идентификации динамических параметров сухого некулонова трения // Фундаментальные исследования. 2012. №. 3-3. С. 638-641.
11. High-performance nonlinear feedback control of a permanent magnet stepper motor / M. Bodson, J. N. Chiasson, R. T. Novotnak, R. B. Rekowski // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 1993. Vol. 1. №. 1. P. 5-14.
12. Lyshevski S. E. Electromechanical systems, electric machines, and applied mechatronics. CRC press, 2018. Т. 3.
13. Control features of the electromechanical system with end-effector considering the regulated torque / A. Malchikov, A. Yatsun, P. Bezmen, O. Tarasov // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2017. Т. 113. С. 02001.
14. Ricci S., Meacci V. Simple torque control method for hybrid stepper motors implemented in FPGA // Electronics. 2018. Vol. 7. №. 10. P. 242.
15. Huang Y. L. et al. Torque-sensorless control of stepper motors for low-cost compliant motion generation // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 94495-94504.
16. Денисов В. А., Жуков А. В. Математическое моделирование работы шагового двигателя в составе мехатронного модуля компенсации износа режущего инструмента // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 6-1. С. 54-58.
17. Степочкин А. О. Моделирование работы шагового электрического двигателя гибридного типа в пакете Simulink // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. №. 8. С. 308-315.
18. Моделирование электромеханического привода с гибридным шаговым двигателем роботизированной платформы / Л. А. Рыбак, Н. Н. Черкашин, А. А. Гунькин, А. В. Чичварин // Современные проблемы науки и образования. 2014. №. 6. С. 334-334.
19. Шмакова Ю. В. Математическое моделирование работы шагового двигателя в системе сканирования рентгенодифракционного прибора // Исследовано в России. 2000. Т. 3. С. 80-80.

20. Novel modeling and damping technique for hybrid stepper motor / K. W. H. Tsui, N. C. Cheung, K. C. W. Yuen // *IEEE transactions on industrial electronics*. 2008. Vol. 56. №. 1. P. 202-211.

References

1. Akhmetshin T. F. Sertifikatsiya aviacionnoj tekhniki [Certification of aviation equipment]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*, 2014, vol. 18, no. 2 (63), pp. 10-18.

2. Alexandrovskaya L. N., Kuznetsov A. G., Solonnikov Yu. I. Analiz zarubezhnogo opyta sertifikatsii bortovykh sistem vozdukhnykh sudov [Analysis of foreign experience in certification of on-board aircraft systems]. *Trudy MIEA. Navigatsiya i upravlenie letatel'nyimi apparatami* = *Proceedings of the IEA. Navigation and Control of Aircraft*, 2010, no. 2, pp. 36-51.

3. Buryachenko A. G., Ranchenko G. S. Ispytatelnaya baza i metodicheskoe obespechenie ispytaniy otvetstvennykh izdelij aviacionnoj tekhniki [Test base and methodological support for testing critical products of aviation equipment]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* = *Aerospace Engineering and Technology*, 2008, no. 4, pp. 75-78.

4. Gorbunov V. V., Novikov V. V., Karpeev A.M. Razrabotka stenda dlya ispytaniya ustroystv avtonomnogo pitaniya bortovykh aviatsionnykh apparatov na osnove litiionnykh batarei [Development of a stand for testing devices for autonomous power supply of onboard aircraft based on lithium-ion batteries]. *Avtomatizatsiya i upravlenie v mashino-i priborostroe-nii* = *Automation and Control in Machine and Instrument Engineering*, 2020, pp. 14-17.

5. Laperdin A. I., Yurkevich V. D. Razrabotka stenda dlya ispytaniya ustroystv avtonomnogo pitaniya bortovykh aviatsionnykh konstruktsiy [Development of an adaptive algorithm for controlling the stand of strength tests of aircraft structures]. *Avtometriya* = *Autometry*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 51-58.

6. Malchikov A.V., Jatsun S. F., Yatsun A. S. Matematicheskoe modelirovanie kopiruyushchego upravleniya robototekhnicheskim ustroystvom, osnashchennym lineinym elektroprivodom s uprugim zvenom [Mathematical modeling of copying control of a robotic device equipped with a linear electric drive with an elastic link]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* = *Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*, 2019, no. 5, pp. 34-42.

7. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Adaptive Control System for DC Electric Drive under Uncertainty. *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, IEEE, 2020, pp. 1-5.

8. Yatsun A., Karlov A., Malchikov A., Jatsun S. Investigation of the dynamical characteristics of the lower-limbs exoskeleton actuators. *MATEC Web of Conferences, EDP Sciences*, 2018, vol. 161, 03008 p.

9. Lushnikov B. V., Kotelnikov V. Ya., Zhakin A. I. Research Of Dynamics Of System With The Dry Uncolomb Friction At Frictional Self-Oscillations [Investigation of the dynamics of a system with dry non-molecular friction under frictional self-oscillations]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2012, no. 1-2, pp. 27-35.
10. Lushnikov B. V. Ispytatel'nyi stand dlya identifikatsii dinamicheskikh parametrov sukhogo nekulonova treniya [Test bench for identification of dynamic parameters of dry non-coulomb friction]. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2012, no. 3-3, pp. 638-641.
11. Bodson M., Chiasson J. N., Novotnak R. T., Rekowski R. B. High-performance non-linear feedback control of a permanent magnet stepper motor. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1993, vol. 1, no. 1, pp. 5-14.
12. Lyshevski S. E. *Electromechanical systems, electric machines, and applied mechatronics*. CRC press, 2018, vol. 3.
13. Malchikov A., Yatsun A., Bezmen P., Tarasov O. Control features of the electromechanical system with end-effector considering the regulated torque. *MATEC Web of Conferences, EDP Sciences*, 2017, vol. 113, 02001 p.
14. Ricci S., Meacci V. Simple torque control method for hybrid stepper motors implemented in FPGA. *Electronics*, 2018, vol. 7, no. 10, 242 p.
15. Huang Y. L. et al. Torque-sensorless control of stepper motors for low-cost compliant motion generation. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 94495-94504.
16. Denisov V. A., Zhukov A. V. Matematicheskoe modelirovanie raboty shagovogo dvigatelya v sostave mekhatronnogo modulya kompensatsii iznosa rezhushchego instrumenta [Mathematical modeling of the operation of a stepper motor as part of a mechatronic module for compensation of cutting tool wear]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 6-1, pp. 54-58.
17. Stepochnik A. O. Modelirovanie raboty shagovogo elektricheskogo dvigatelya gibridnogo tipa v pakete Simulink [Modeling the operation of a stepper electric motor of a hybrid type in the Simulink package]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo uni-versiteta. Tekhnicheskie nauki = News of Tula State University. Technical Science*, 2018, no. 8, pp. 308-315.
18. Rybak L. A., Cherkashin N. N., Gunkin A. A., Chichvarin A. V. Modelirovanie elektromekhanicheskogo privoda s gibridnym shagovym dvigatelem robotizirovannoi platformy [Modeling of an electromechanical drive with a hybrid stepper motor of a robotic platform]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, 2014, no. 6, pp. 334-334.

19. Shmakova Yu. V. Matematicheskoe modelirovanie raboty shagovogo dvigatelya v sisteme skanirovaniya rentgenodifraktsionnogo pribora [Mathematical modeling of the operation of a stepper motor in the scanning system of an X-ray diffraction device]. *Issledovano v Rossii = Researched in Russia*, 2000, vol. 3, pp. 80-80.

20. Tsui K. W. H., Cheung N. C., Yuen K. C. W. Novel modeling and damping technique for hybrid stepper motor. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2008, vol. 56, no. 1, pp. 202-211.

Информация об авторах / Information about the Authors

Яцун Сергей Фёдорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7420-0772>, ResearcherID G-3891-2017

Sergey F. Yatsun, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7420-0772>, ResearcherID G-3891-2017

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

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

Яцун Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Andrey S. Yatsun, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Субботин Евгений Владимирович, аспирант кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: subbo1299@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1528-1338>

Evgeniy V. Subbotin, Post-Graduate Student, Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: subbo1299@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1528-1338>

Оценка нагруженности протоколов обмена данными для БПЛА на базе интеллектуальных компонентов

С. Г. Черный^{1,2} ✉, Н. В. Шипаренко², М. В. Чупаков³

¹ Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, ул. Двинская, д. 5/7, г. Санкт-Петербург 198035, Российская Федерация

² Керченский государственный морской технологический университет, ул. Орджоникидзе, д. 82, г. Керчь 298309, Республика Крым, Российская Федерация

³ Черноморское высшее военно-морское училище имени П.С. Нахимова, ул. Дыбенко, д. 1а, г. Севастополь 299028, Российская Федерация

✉ e-mail: sergiiblack@gmail.com

Резюме

Цель работы заключается в изучении работы протоколов на различных уровнях взаимодействия, предложить варианты улучшения безопасности взаимодействия на основе внедрения интеллектуальных компонентов. В последние годы значительно вырос интерес к использованию дронов в различных сферах. Причины связаны с непрерывным ростом технологий, особенно с появлением быстрых микропроцессоров, которые обеспечивают автономное управление несколькими системами. Фотография, строительство, контроль и наблюдение – лишь некоторые из областей, в которых использование дронов становится обычным явлением.

Методы. В статье рассматриваются протоколы, задействованные в работе БПЛА на разных уровнях, их особенности, преимущества и недостатки, а также их нагруженность и обеспечение безопасности. 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.

Задачами исследования являются детализация протоколов обмена информации в БПЛА по различным уровням, с учетом анализа структуры передаваемой информации.

Результаты. Рациональное использование энергии имеет решающее значение для осуществления эффективного и безопасного процесса работы БПЛА. Перебои в энергоснабжении могут нанести серьезный ущерб району полета. Затронуты и рассмотрены вопросы корреляции загрузки протокола связанных с потреблением энергии и стратегиями зарядки.

Заключение. Исследование изучает различные протоколы обмена данными, которые используются в системах БПЛА, а также анализирует их производительность. Для качественной оценки влияния на безопасность информации, предлагается ввести интеллектуальные компоненты, которые динамически адаптируют протоколы обмена данными на основе анализа угроз в режиме работы в реальном времени и возможностей системы.

Ключевые слова: БПЛА; протокол; уязвимость; реальное время; угроза; информационная безопасность; загруженность протоколов; реальное время.

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

Для цитирования: Черный С. Г., Шипаренко Н., Чупаков М. Оценка нагруженности протоколов обмена данными для БПЛА на базе интеллектуальных компонентов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(3): 128-151. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-128-151>.

Поступила в редакцию 10.08.2023

Подписана в печать 02.09.2023

Опубликована 28.10.2023

Assessment of Data Exchange Protocol Workload in Uavs on Intelligent Components

Sergey G. Cherny ^{1,2} ✉, Nikita V. Shiparenko ², Maksim V. Chupakov ³

¹ State University of Marine and River Fleet named after admiral S.O. Makarov
5/7 Dvinskaya str., St. Petersburg 198035, Russian Federation

² Kerch State Marine Technological University
82 Ordzhonikidze str., Kerch, 298309, Republic of Crimea, Russian Federation

³ Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov,
1a, Dybenko str., Sevastopol 299028, Russian Federation

✉ e-mail: sergiiblack@gmail.com

Abstract

Purpose of research. In recent years, interest in the use of drones in various fields has grown significantly.

Methods. The reasons are due to the continuous growth of technology, especially the advent of fast microprocessors that enable autonomous control of multiple systems. Photography, construction, inspection and surveillance are just some of the areas in which the use of drones is becoming commonplace. The purpose of the work is to study the operation of protocols at various levels of interaction, to propose options for improving the security of interaction based on the introduction of intelligent components. The article discusses the protocols involved in the operation of UAVs at different levels, their features, advantages and disadvantages, as well as their load and security. 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.

The objectives of the study are to detail the protocols for information exchange in UAVs at various levels, taking into account the analysis of the structure of the transmitted information.

Results. The study examines various communication protocols used in UAV systems and also analyzes their performance. To qualitatively assess the impact on information security, it is proposed to introduce intelligent components that dynamically adapt data exchange protocols based on real-time threat analysis and system capabilities.

Conclusion. Efficient use of energy is critical to efficient and safe UAV operation. Power outages can cause serious damage to the flight area. The issues of correlation of protocol load associated with energy consumption and charging strategies are touched upon and considered.

Keywords: UAV; protocol; vulnerability; real time; threat; information security; protocol load; real time.

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., 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>.

Received 10.08.2023

Accepted 02.08.2023

Published 28.10.2023

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.

БПЛА зачастую маневренны, малогабаритны и могут быть управляемы с больших расстояний. Самой логичной боевой задачей стали сбор и обработка чувствительной визуальной и параметрической информации во время выполнения заданий, что в свою очередь требует обеспечения быстродействия и должного уровня безопасности нагруженных протоколов обмена данными в БПЛА с акцентом на повышение безопасности информации с использованием интеллектуальных компонентов [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 работе 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 содержимое 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 интер-

фейс, который был разработан для обмена данными между микроконтроллерами и периферийными устройствами, такими, как сенсоры, датчики, дисплеи и другие. Он работает в полудуплексном режиме. SPI не предоставляет встроенных механизмов безопасности, поскольку он только обеспечивает обмен данными между устройствами и не имеет методов шифрования или аутентификации, но обладает высокой скоростью передачи данных и широким применением во многих устройствах, где требуется высокая производительность и простота обмена данными (рис.1).

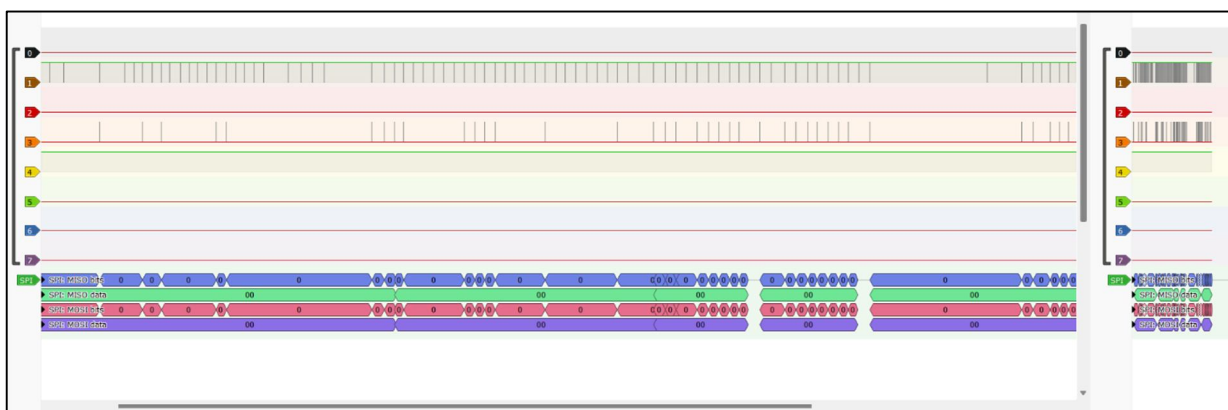


Рис. 1. Захваченная выборка логическим анализатором длиной в 3 секунды, декодированная как содержащая обмен данными по шине SPI

Fig. 1. Logic analyzer captured sample of 3 seconds, decoded as SPI data exchange

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).

В общем случае, протокол SPI передает данные по линии MOSI и MISO синхронно с тактовым сигналом SCLK (Serial Clock). Каждый бит данных передается на каждом тактовом переходе.

Также следует отметить, что 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.

В отличие от SPI, *I²C* использует всего 2 сигнальные линии – SDA (Serial Data) и SCL (Serial Clock), но при этом позволяет на высокой скорости, работая в полудуплексном режиме, подключать множество устройств на одной шине (до 128).

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. Выборка снята в момент опроса адресов на шине (рис. 2).

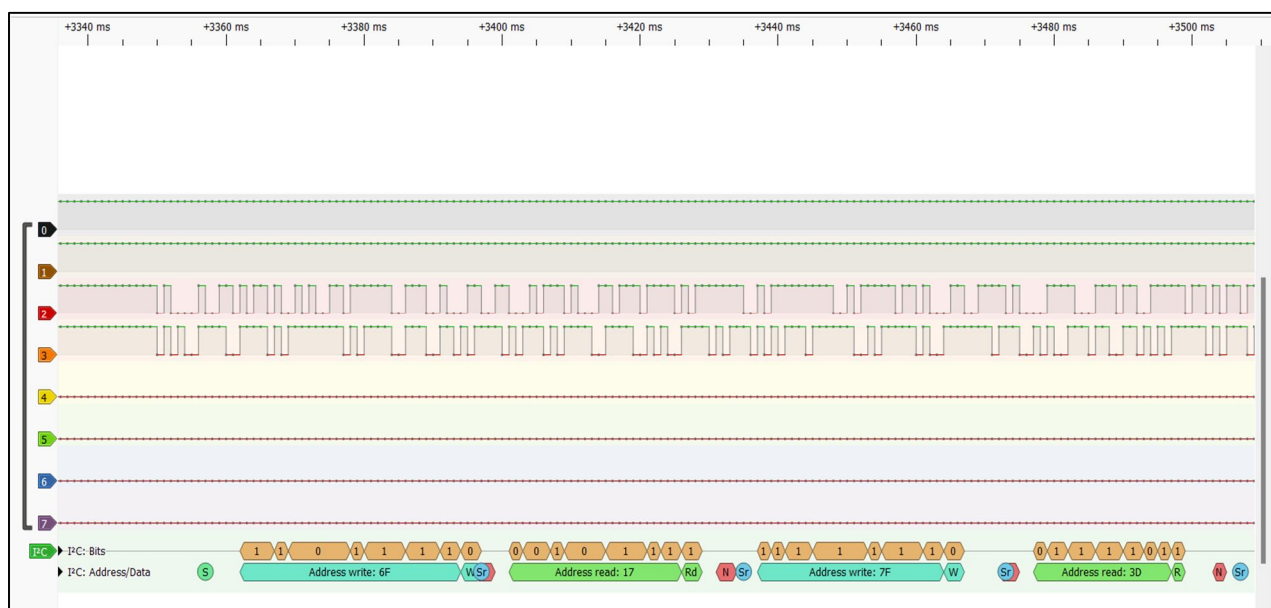


Рис. 2. Захваченная выборка логическим анализатором длиной в 3 секунды, декодированная как содержащая *I²C* сообщения, их содержимое, длина адресов

Fig. 2. Logic analyzer captured sample 3 seconds long, decoded as containing *I²C* (contents, address length)

I²C (Inter-Integrated Circuit) — это протокол обмена данными между микросхемами на коротких расстояниях и поддерживает одновременную работу множества устройств, подключенных к одной шине.

Важно учесть, что *I²C* поддерживает ведущие устройства на линии одновременно, однако в БПЛА стоит придерживаться одного master на линии, чтобы не приводить к конфликтам и коллизиям на шине, или проводить гра-

мотное планирование и управление шиной во избежание ошибок и неправильного чтения \ записи данных [3-5].

UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) – асинхронный последовательный интерфейс, который используется для передачи данных между устройствами. Он широко применяется в связке с компьютерами, периферийными устройствами и микроконтроллерами, работая в полудуплексном режиме, он использует 2 сигнальные линии – Tx (сигнал передачи) и Rx (сигнал приёма).

UART, в отличие от вышеизложенных протоколов выше не имеет линии для синхронизации скорости передачи данных, так как он подразумевает, что оба (предельное количество устройств на шине) имеют одинаковые настройки. Реализует механизмы обеспечения безопасности данных, его задача – обеспечить быструю и качественную передачу данных между устройствами. Он прост в настройке и использовании – в БПЛА может использоваться для подключения GPS-модуля, различных радиопередатчиков и с другими периферийными устройствами (рис. 3).

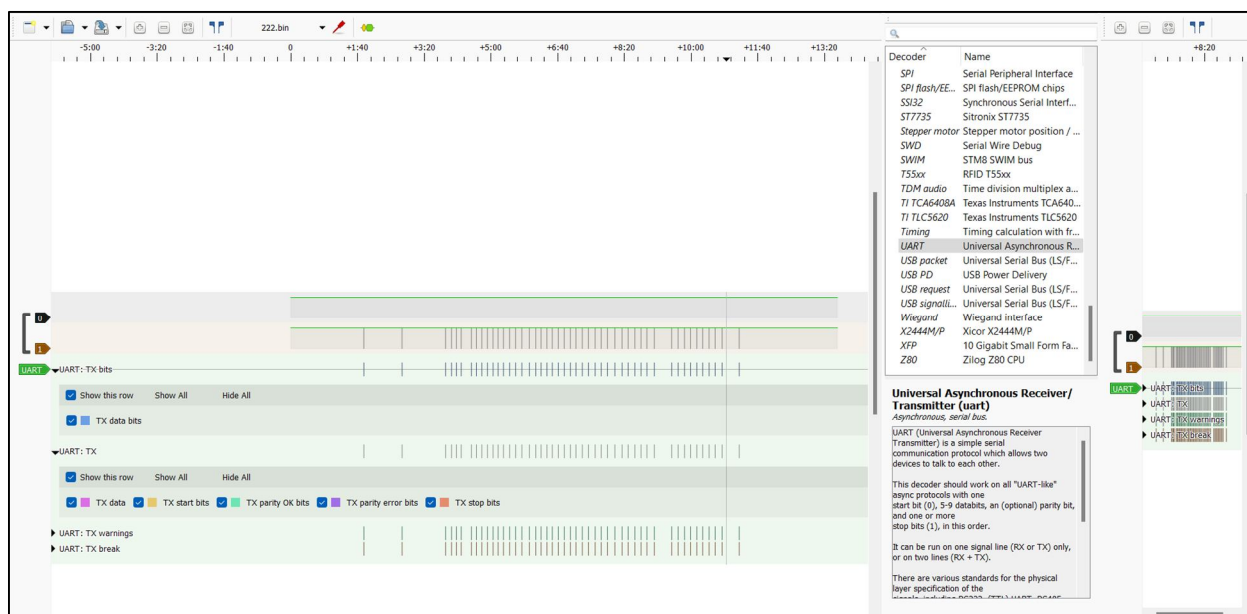


Рис. 3. Захваченная выборка логическим анализатором длиной в 3 секунды, декодированная как содержащая UART сообщения

Fig. 3. Logic analyzer captured 3 second decoded as containing UART messages

Сообщение в протоколе UART представляет собой последовательность бит, передаваемых последовательно по одной линии (обычно линия TX для передачи и RX для приёма – они соединены «крест-накрест» у передающего и принимаемого устройства). Протокол UART работает в

асинхронном режиме, что означает отсутствие отдельной тактовой линии для синхронизации передачи данных. Вместо этого, каждый символ передается с использованием начального бита, нескольких данных бит и опционального бита четности и/или конечного бита.

Jitter (фазовое дрожание цифрового сигнала данных) — это 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 при-

еме данных и вызывать некорректную интерпретацию символов [5-7].

Допустим, одни и те же захваченные выборки можно проанализировать, не зная реальной скорости UART, указав свою предполагаемую.

Так данные выглядят при установке скорости 9600 бод (рис. 4).

А так при 115200 бод (рис. 5).



Рис. 4. Снимок выборки, декодированной как UART на скорости 9600 бод

Fig. 4. Snapshot of sample decoded as UART at 9600 baud

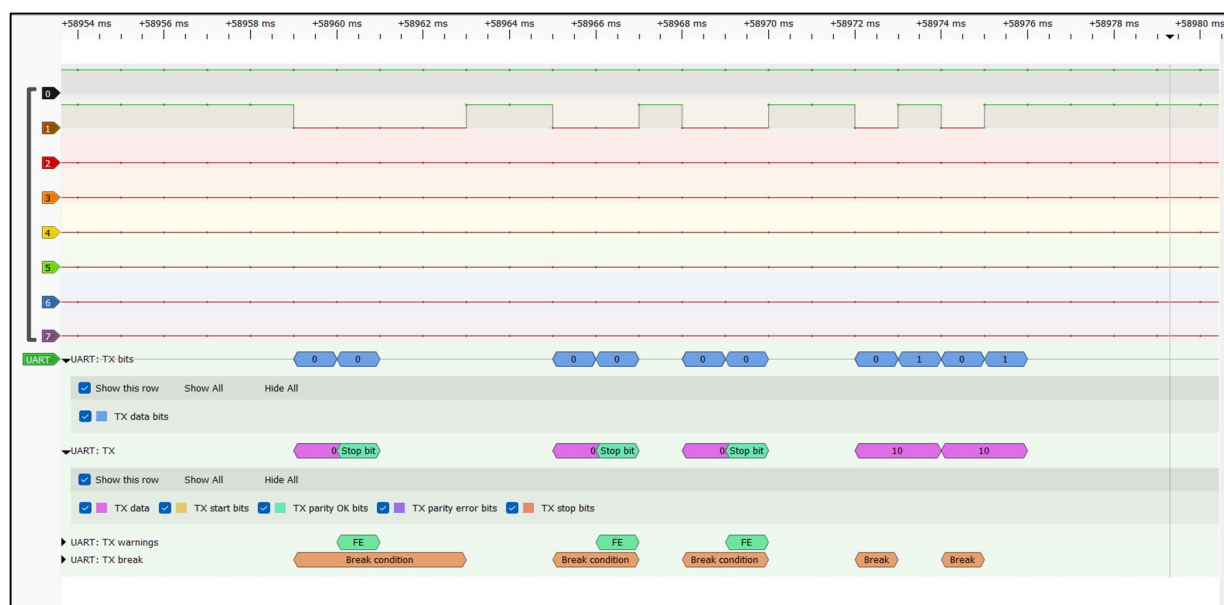


Рис. 5. Снимок выборки, декодированной как UART на скорости 115200 бод

Fig. 5. Snapshot of sample decoded as UART at 115200 baud

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 потеря и искажения сообщений. Это можно избежать, используя специальные микросхемы, которые обеспечивают стабильность часов (точное внешнее тактирование с кварцевого резонатора или генератора), выполнять коррекцию уже существующих ошибок (ECC).

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 [3, 8].

Применимо к Raspberri Pi 3 и дрону, основанному на микроконтроллере STM32F407VGT6, можно составить сравнительную табл. 1.

Таблица 1. Сравнительная характеристика поддержки UART

Table 1. 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)

Стоит обратить внимание, что Raspberri Pi 3 имеет только один встроенный UART порт (UART0), в то время как STM32F407VGT6 обладает несколькими встроенными UART портами [4, 6]. Кроме того, STM32F407VGT6 предоставляет больше гибкости в выборе количества бит данных (8 или 9) и стоп-битов (1, 1.5 или 2) (рис. 6).

Джиттер также может вызывать смещение временных интервалов в выборке логического анализатора между символами, что приводит к неправиль-

ному 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.

Результаты и их обсуждение

Ошибки интерпретирования стартового и стоп-битов приведут к неправильному определению границы символов и протокольных пакетов, а это, в свою очередь, помешает декодированию всего сообщения [5,7-9].

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. Он предоставляет набор функций и алгоритмов для управления полётом и автономного перемещения, что делает его популярным выбором для создания автономных и ручных систем БПЛА.

Однако, чтобы собрать собственный дрон недостаточно просто установить программный комплекс или выполнить заливку прошивки на микроконтроллер, нужны и другие компоненты:

Интерфейс Ardupilot в браузере обычно реализуется через веб-сервер, который работает на борту БПЛА или наземной станции и предоставляет доступ к управлению и настройке БПЛА через веб-браузер на устройствах, поддерживающих интернет-браузеры [6-8].

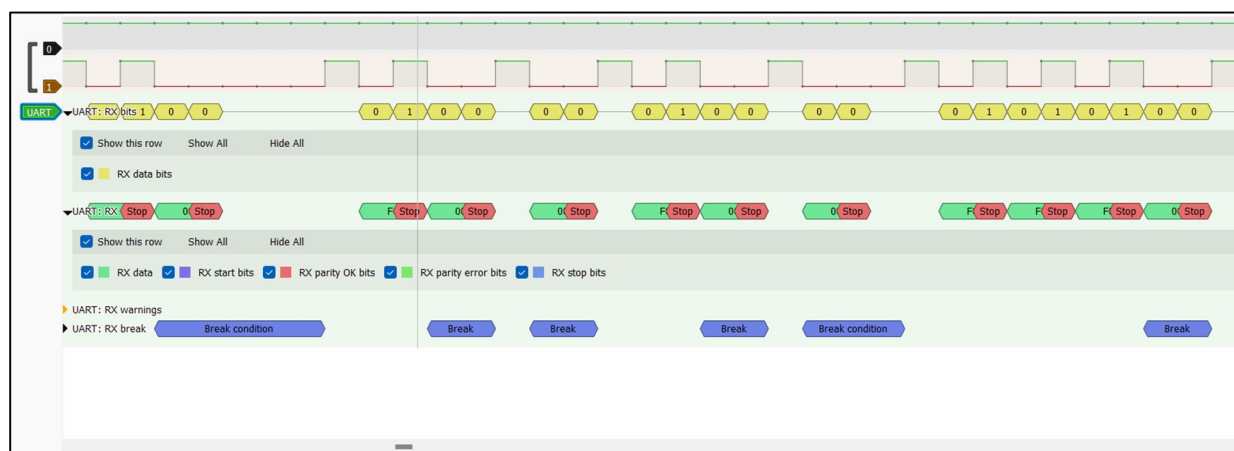


Рис. 6. Снимок выборки, декодированной как UART на скорости 9600 бод с битовым содержанием сообщения

Fig. 6. Snapshot of the sample decoded as UART at 9600 baud with message bit content

Информационные протоколы

MAVLink (Micro Air Vehicle Communication Protocol) – это протокол обмена сообщениями для беспилотных лета-

тельных 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 использует сообщения различных типов:

- о состоянии (*HEARTBEAT*): Сообщение с основной информацией о состоянии БПЛА, такой как режим полета, заряд батареи и качества связи;

- о позиции (*GLOBAL_POSITION_INT*): Сообщение, содержащее информацию о координатах положения БПЛА (широта, долгота, высота);

- о команде управления (*COMMAND_LONG*): Сообщение, которое позволяет отправить команды управления БПЛА,

такие как взлет, посадка, изменение скорости, операции маневрирования и другие действия;

- о состоянии батареи (*SYS_STATUS*): Сообщение с информацией о заряде батареи и других состояниях системы.

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. Запись сообщения в битовой нотации (48 бит всего), не считая конечного блока контрольной суммы с учётом содержимого полей и диапазонов данных (таб.2).

Таблица 2. Запись сообщения в битовой нотации (48 бит)

Table 2. Recording a message in bit notation (48 bits)

№	Название (RU) / Name (EN)	Название (EN) / Name (EN)	Размер (бит) / Size (bit)	Значение (по умолчанию) / Value (default)	Диапазон / Range
1	Старт	Start	8	0xFE	Фиксированное значение (0xFE)
2	Длина	Length	8	Обычно равна 9	0-255
3	ID	ID	8	0	0-255
4	Версия	Autopilot type	8	Идентификатор автопилота	0-255
5	Система ID	System ID	8	Идентификатор БПЛА/системы	1-255
6	Статус	Custom mode	8	Статус и режим работы БПЛА	1-255

Это представление не включает контрольную сумму, которая является конечным блоком в записи сообщения

MavLink и используется для проверки целостности данных.

Контрольная сумма в данном протоколе вычисляется при помощи алгоритма XOR (оно же – «исключающее

ИЛИ»), применяемого для всех байт данных сообщения, за исключением поля стартового байта (таб.3).

Таблица 3. Отправленное сообщение Heartbeat с БПЛА в шестнадцатеричной записи

Table 3. The Heartbeat message sent from the UAV in hexadecimal notation

Старт: 0xFE	Длина: 0x09	ID: 0x00	Версия: 0x03	Система ID: 0x01	Статус: 0x01	Контрольная сумма: 0x0C
----------------	----------------	-------------	-----------------	---------------------	-----------------	----------------------------

Контрольная сумма сообщения Heartbeat из табл. 6 вычисляется так:

XOR (0x09, 0x00, 0x03, 0x01, 0x01)

Детально:

Запишем байты в двоичной системе и обозначим их как переменные B1, B2, B3, B4, B5

B1= 0x09 (00001001 в двоичной системе)

B2= 0x00

(00000000 в двоичной системе)

B3= 0x03

(00000011 в двоичной системе)

B4=0x01

(00000001 в двоичной системе)

B5= 0x01 (00000001 в двоичной системе)

Для вычисления XOR ($\oplus$) мы начинаем сравнивать каждый бит в позиции 0 (младший бит) у всех байтов (двигаясь справа налево):

Позиция 0 (младший бит):

$$B1[0] \oplus B2[0] \oplus B3[0] \oplus B4[0] \oplus B5[0] = 1 \oplus 0 \oplus 1 \oplus 1 \oplus 1 = 0$$

Позиция 1:

$$B1[1] \oplus B2[1] \oplus B3[1] \oplus B4[1] \oplus B5[1] = 0 \oplus 0 \oplus 0 \oplus 0 \oplus 0 = 0$$

Позиция 2:

$$B1[2] \oplus B2[2] \oplus B3[2] \oplus B4[2] \oplus B5[2] = 0 \oplus 0 \oplus 0 \oplus 0 \oplus 0 = 0$$

Позиция 3:

$$B1[3] \oplus B2[3] \oplus B3[3] \oplus B4[3] \oplus B5[3] = 0 \oplus 0 \oplus 0 \oplus 0 \oplus 0 = 0$$

Позиция 4:

$$B1[4] \oplus B2[4] \oplus B3[4] \oplus B4[4] \oplus B5[4] = 1 \oplus 0 \oplus 0 \oplus 0 \oplus 0 = 1$$

Позиция 5:

$$B1[5] \oplus B2[5] \oplus B3[5] \oplus B4[5] \oplus B5[5] = 0 \oplus 0 \oplus 0 \oplus 0 \oplus 0 = 0$$

Позиция 6:

$$B1[6] \oplus B2[6] \oplus B3[6] \oplus B4[6] \oplus B5[6] = 0 \oplus 0 \oplus 0 \oplus 0 \oplus 0 = 0$$

Позиция 7:

$$B1[7] \oplus B2[7] \oplus B3[7] \oplus B4[7] \oplus B5[7] = 0 \oplus 0 \oplus 1 \oplus 0 \oplus 0 = 1$$

После вычисления значений в позициях, собираем все биты обратно в байт: 0b00001100 (в двоичной системе) = 0x0C (в шестнадцатеричной).

Таким образом, результат операции XOR на каждой позиции для всех байтов (0x09, 0x00, 0x03, 0x01, 0x01) равен 0x0C – это и есть контрольная сумма.

Если при передаче сообщения произойдёт искажение, то контрольная сумма, вычисленная на стороне приёмника, не совпадёт с переданной в сообщении и такое сообщение будет отброшено, и отправителю передается запрос на повторную передачу [11-13].

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.

Архитектурно он сильно отличается от Mavlink - MQTT основан на модели публикации или подписки, в которой ведущие устройства могут публиковать сообщения на определенные темы, а ведомые устройства могут подписаться на эти темы и получать сообщения. Такая модель не требует постоянно оставаться на линии и сканировать эфир на наличие новых сообщений [3, 5, 9].

В MQTT доступно несколько уровней QoS:

QoS 0 («At most once» («Максимум одно»)): Брокер сообщений не подтверждает доставку сообщения. Сообщение доставляется только один раз и может быть потеряно.

QoS 1 («At least once» («Хотя бы одно»)): Брокер подтверждает получение сообщения. Если клиент не получает подтверждение от брокера, он повторно отправляет сообщение.

QoS 2 («Exactly once» («Точно одно»)): Брокер подтверждает доставку сообщения. Клиент и брокер взаимодействуют для гарантированной доставки сообщения ровно один раз.

БПЛА через брокера сообщений получает 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. 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). Более энергосберегающий и адаптирован под централизованные системы с ведущими и ведомыми устройствами, где брокеры сообщений связывают всех воедино.

MavLink – 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.

Негативные факторы ухудшения связи в БПЛА

Негативные факторы, которые могут ухудшить связь в БПЛА (Беспилотные 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. Негативно влияет на передачу информации, в месте плохого контакта может искажаться проходящий сигнал (рис. 7).

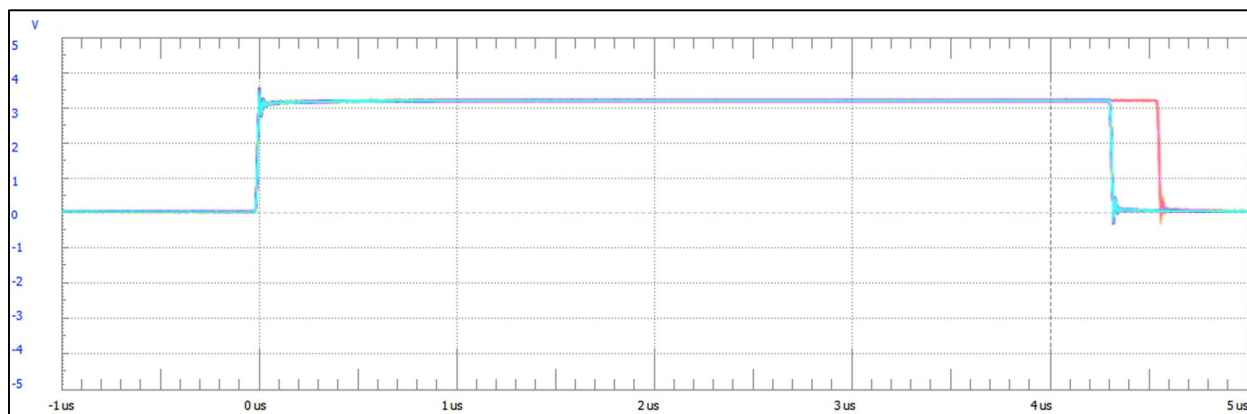


Рис. 7. Осциллограмма перекрёстно замкнутых TX и RX линий в момент отправки сообщения по протоколу UART

Fig. 7. Oscillogram of cross-connected TX and RX lines at the moment of sending message of UART protocol

Холодная пайка может привести к ненадежным соединениям и повышенному сопротивлению на паянных контактах, что может вызвать некачественную передачу сигналов и ухудшение связи. Для борьбы с данными сбоями используют качественные припои, флюсы, нагревать место соединений до правильной температуры и обеспечивать надлежащую связь между паяными контактами, прибегать к автоматизации процесса пайки [3, 7, 9].

Помехи электромагнитного излучения (ПЭМИН)

ПЭМИН — электромагнитные помехи, которые могут возникнуть вокруг электронных устройств или кабелей, искажая или прерывая передачу сигнала.

Они могут привести к ошибкам в передаче данных и потере сигнала, особенно на высоких частотах. Для борьбы с ПЭМИН используются экранированные кабели, ферритовые кольца, а также правильное размещение и экранирование электронных компонентов.

Подтяжки к питанию и земле

Подтяжки к питанию и земле (Pull-up и Pull-down) — это резисторы, которые подключаются к пинам линий данных устройства, чтобы обеспечить определенный уровень напряжения (высокий или низкий) при отсутствии других внешних сигналов. На линии I²C используется обязательная подтяжка к питанию (PullUp) 2.5 вольт резисторами R259 и R261 номиналом 4.7 КоМ (рис. 8).

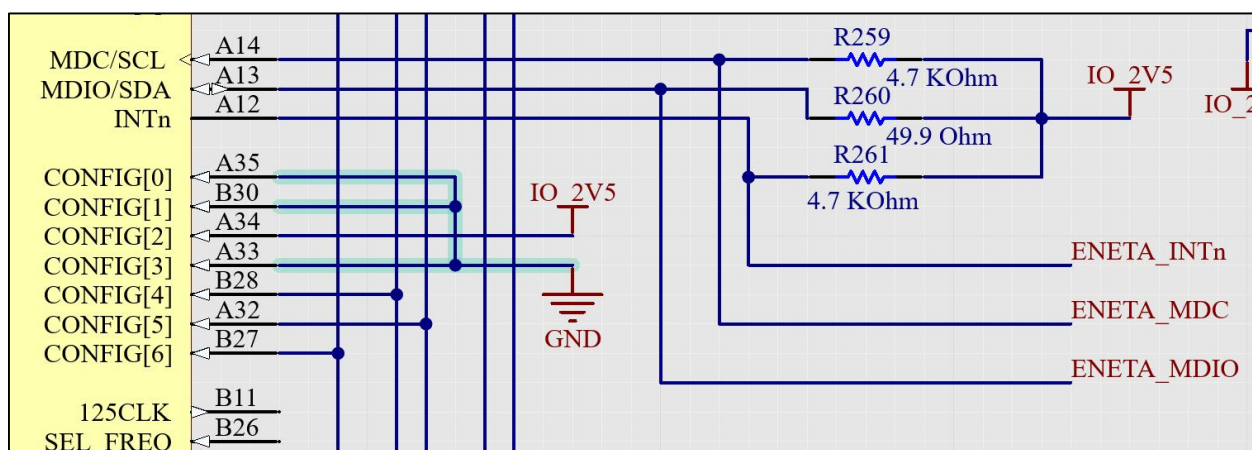


Рис. 8. Электрическая схема сетевого адаптера в БПЛА

Fig. 8. Electrical diagram of the network adapter in the UAV

Подтяжки используются для стабилизации линий связи и предотвращения случайных изменений уровней напряжения, они обеспечивают определенное начальное состояние линий связи, что позволяет предотвратить нежелательные переключения сигналов при подключении или отключении устройств [7-10].

В результате исследования были выявлены следующие механизмы обеспечения безопасности:

1. Шифрование данных: в протоколах MQTT и CoAP могут использоваться механизмы шифрования TLS/SSL (Transport Layer Security / Secure Sockets Layer), которые обеспечивают защищенное соединение между клиентами и серверами. Это позволяет защитить передаваемые данные от перехвата и несанкционированного доступа [11].

2. Аутентификация: в том же протоколе MQTT есть возможность использования имени пользователя и пароля для аутентификации клиентов. Это

позволяет удостоверить легитимность участников передачи данных.

3. Цифровая подпись: в протоколе MAVLink реализована поддержка цифровой подписи сообщений для обеспечения их подлинности и целостности. Цифровая подпись гарантирует, что сообщения не были изменены после отправки и что их отправитель является доверенным.

4. Проверка контрольных сумм: в протоколах низких уровней: UART, SPI и I2C контрольные суммы или CRC (циклический избыточный код) могут использоваться для обнаружения ошибок в передаче данных по физическим интерфейсам. Позволяет компонентам в БПЛА обнаружить поврежденные или потерянные данные и предпринять соответствующие меры, например, повторно запросить поврежденные данные.

5. Обмен ключами: возвращаясь к MQTT, при использовании шифрования TLS/SSL может выполняться обмен ключами.

чами для установления безопасного канала связи между клиентами и брокером. Обмен ключами обеспечивает конфиденциальность и защиту передаваемых данных.

6. Ограничение прав доступа: в противовес, в протоколе MAVLink могут быть определены различные уровни доступа к командам и параметрам, что позволяет ограничить права доступа различных компонентов в БПЛА. Например, некоторые команды могут быть доступны только для авторизованных устройств [12-14].

7. Обновления прошивки и защита от вторжений: Интеллектуальные компоненты в БПЛА, такие как микроконтроллеры, могут быть обновлены с использованием защищенных каналов связи. Это позволяет обновлять прошивку, исправлять уязвимости и улучшать безопасность системы.

Обновление прошивки можно проводить по защищенным каналам напрямую к облачным серверам производителя (такое обновление называется «Обновление по воздуху» - OTA). При установлении соединения требуется отдельно проверить подлинность сервера – на случай, если используется подмена конечного сервера для попытки взлома БПЛА. Также, ввиду того, что зачастую в дронах используются 32-битные процессоры с высокой тактовой частотой, основанные на ARM/RISC и других аналогичных архитектурах, на многих из них возможен запуск ОС Linux после определённых действий по портирова-

нию (перестройке образа системы под определенную архитектуру БПЛА).

В таком случае, благодаря универсальности ОС Linux, возможно установить и использовать систему обнаружения вторжений, например, Snort. Также можно фильтровать трафик на стороне наземной станции.

8. Отказоустойчивость и резервирование: в БПЛА используется множество интеллектуальных компонентов и датчиков, работающих в различных режимах и диапазонах. Чтобы обеспечить высокую отказоустойчивость и надежность работы системы, следует применить стратегию резервирования датчик и питания.

Например, в случае отказа одного из компонентов, система автоматически переключится на работу с резервным компонентом, что обеспечит непрерывность работы БПЛА.

В случае отказа основного блока аккумулятора, можно реализовать систему аварийного ввода резерва и подключение от запасного аккумулятора.

Резервирование также может помочь в случае с комплексными преградами. Предположим, стоит задача в полёте обнаружить подвижные препятствия. Если один из датчиков выходит из строя или предоставляет неточные данные (например, датчик УФ может засветить солнечный луч), система может автоматически переключиться на работу с другим рабочим датчиком и продолжить выполнение задачи навигации.

9. Фильтрация входящих данных [12-15]. Интеллектуальные компоненты в БПЛА могут применять фильтрацию входящих данных, чтобы предотвратить получение и обработку некорректных, аномальных или вредоносных данных от других устройств. Фильтры могут быть реализованы на уровне программного обеспечения или же встроены в аппаратное обеспечение, например, в тот же развёрнутый дистрибутив Linux.

Однако важно понимать, что БПЛА важно делать легковесным – это в первую очередь аппарат, который в основном занят обеспечением полёта, а развёртывание систем проактивного обнаружения и противодействия вторжений может вызвать сильную конкуренцию за ресурсы в БПЛА и в конечном итоге оказать негативное влияние на работу архитектуры в целом, даже когда атаки никакие и не совершаются.

Тем более, аномальное поведение сети в стрессовых условиях, в движении БПЛА и помехах вокруг вполне может быть беспочвенным и не представляющим опасность – например, может приходиться электромагнитная наводка на антенны дрона.

10. Отключение неиспользуемых интерфейсов: если рассматривать процессор\микроконтроллер БПЛА детально как интеллектуальный компонент, то он зачастую имеет несколько интерфейсов для связи с другими устройствами, которые могут не использоваться и просто использоваться в режиме ожидания\отладки. При использовании про-

токолов, таких как SPI, UART или I²C, можно отключить неиспользуемые интерфейсы, чтобы предотвратить возможность несанкционированного доступа или атак на неиспользуемые порты, допустим если БПЛА был перехвачен и подвергается реверс-инжинирингу.

11. Проверка и ограничение размера сообщений: в протоколах MQTT и CoAP можно настроить максимальный размер сообщений для передачи. Это позволяет предотвратить передачу чрезмерно больших пакетов данных, которые могут привести к переполнению буферов и атакам на переполнение буфера.

12. Защита от ретрансляции: для протоколов, таких как MAVLink и MQTT, можно применять механизмы защиты от повторной передачи (replay attack). Это предотвращает возможность воспроизведения старых или повторных команд и сообщений, что может быть использовано злоумышленниками для внедрения нежелательных команд или данных [14-17].

13. Проверка подлинности источников: в протоколах MQTT и MAVLink можно применять механизмы проверки подлинности источников сообщений. Это позволяет убедиться, что полученные данные и команды действительно исходят от доверенного и аутентифицированного источника.

14. Физическая безопасность: Компоненты в БПЛА могут быть размещены в защищенных от несанкционированного доступа корпусах или креплениях. Также можно использовать методы маркиров-

ки и аутентификации компонентов, чтобы обеспечить физическую безопасность и предотвратить возможность замены или подмены устройств – это могут быть пломбы, легкоплавкие предохранители, собственные системы защиты.

Протоколы прикладного уровня передачи потоковых данных [15-18]

RTSP (Real Time Streaming Protocol)

RTSP (Real-Time Streaming Protocol) – это протокол передачи потокового видео и аудио данных в реальном времени через сети IP. Он был разработан для обеспечения доставки мультимедийных данных с минимальными задержками, что делает его особенно подходящим для применения в системах, где требуется стриминг данных в реальном времени, таких как БПЛА для передачи видео с камеры в операционный центр. RTSP имеет ряд особенностей, благодаря которым он может применяться при работе с БПЛА:

- **Управление потоком:** RTSP предоставляет возможность управлять потоками мультимедийных данных – это функции паузы, воспроизведения, остановки и перемотки видео потоков.

- **Является протоколом управления данными** – он не транспортирует сам поток данных, а только управляет воспроизведением и передачей

- **Гибкий:** может использоваться как при трансляции видео, так и в видеоконференциях и дистанционным управлением.

- **Открытый:** RTSP является открытым стандартом, что обеспечивает

совместимость с различными устройствами и программными решениями.

- **Работает в реальном времени:**

RTSP обеспечивает передачу видео данных в реальном времени, что позволяет операторам получать актуальную информацию и принимать решения на основе последних данных.

Недостатки:

- **Чувствительные задержки:** несмотря на стремление к минимизации задержек, передача видео данных по сети ввиду физического канала всегда сопряжена с некоторой задержкой, что может быть критически важно в некоторых миссиях БПЛА.

- **Зависим от качества сети:** RTSP требует стабильного и надежного подключения к сети, что может быть ограничивающим фактором в условиях ограниченной доступности сетевой инфраструктуры.

- **Нет шифрования:** RTSP по умолчанию не реализует функции, связанные с безопасностью трафика

RTP (Real-Time Transport Protocol)

– это протокол транспортировки потоковых данных, таких как аудио и видео, в реальном времени через сети IP.

Он является основным протоколом для передачи данных во время аудио- и видеоконференций, стриминга мультимедиа и других приложений, где требуется передача данных в режиме реального времени с минимальной задержкой и потерями.

RTP является более выгодным для применения в БПЛА протоколом, по

сравнению с RTSP и имеет свои положительные стороны:

1. Реализация механизмов синхронизации: RTP включает в себя механизмы временной метки и синхронизации для обеспечения правильного воспроизведения мультимедийных данных в реальном времени.

2. Обработка потерь пакетов: RTP позволяет восстанавливать данные в случае потери некоторых пакетов, что особенно важно для обеспечения качества передачи в условиях непостоянной сети.

3. Минимизация задержек и джиттера: RTP стремится минимизировать задержки и джиттер (переменные задержки пакетов), чтобы обеспечить непрерывную и плавную передачу данных.

4. Реальное время: RTP обеспечивает передачу потоковых данных в реальном времени, что делает его идеальным для передачи видео с БПЛА на наземные станции

5. Адаптивность: RTP способен адаптироваться к изменениям в сети и динамически изменять параметры передачи данных, чтобы минимизировать задержки и потери.

6. Открытый стандарт: RTP является открытым стандартом, что обеспечивает его совместимость с различными устройствами и программами.

Конечно, RTP не идеален, из минусов можно выделить [17-20]:

1. Значительная нагрузка на сеть при потоковой передаче данных, особенно при высоком разрешении видео

или большой пропускной способности данных.

2. Зависимость от качества сети: качество передачи данных с помощью RTP сильно зависит от качества сети, и низкое качество связи может привести к потерям данных или ухудшению качества видео.

3. Безопасность: при использовании RTP для передачи данных важно обеспечить соответствующие меры безопасности, чтобы предотвратить несанкционированный доступ к потоковым данным.

WebRTC (Web Real-Time Communication)

WebRTC (Web Real-Time Communication) — открытый стандарт, который предоставляет возможность передачи аудио, видео и данных в режиме реального времени между веб-браузерами и мобильными приложениями без необходимости установки дополнительных плагинов или программного обеспечения. Данный протокол используется в видеоконференциях и веб-камерах стационарного исполнения, для потоковой трансляции картинки в браузер подключающегося к ним клиентов.

В БПЛА он тоже находит своё применение, благодаря характерным особенностям:

- 1) простота использования - картинка в браузере у клиента;
- 2) снижение задержки в реальном времени;
- 3) может передавать одновременно аудио, видео и произвольные данные

между пользователями – можно передавать таким образом служебную информацию;

4) пиринговая коммуникация (peer-to-peer, точка-точка) позволяет БПЛА соединяться напрямую с клиентом на стороне центра управления;

5) не требует установки дополнительного ПО и поддерживается многими ОС по умолчанию.

Минусы WebRTC в сфере применения в БПЛА весьма аналогичные:

1) зависимость от стабильного интернет-соединения для передачи данных, что мешает дрону в зонах с ограниченным доступом к сети;

2) WebRTC не реализует встроенных механизмов и протоколов безопасности;

3) прямая пиринговая коммуникация в WebRTC может иметь ограничение на количество одновременных пользователей, что может быть проблемой в крупных сетях с множеством пользователей.

SRT (Secure Reliable Transport) — это открытый протокол транспортировки данных, который обеспечивает безопасную и надежную передачу аудио- и видеопотоков в реальном времени через сети IP. Разработан для преодоления проблем низкой пропускной способности, потерь данных и высокой задержки, что делает его особенно подходящим для применения в условиях неблагоприятных сетевых условий, таких как недостаточная пропускная способность или нестабильное соединение.

У SRT много ключевых особенностей:

1. Надежность и восстановление потерь: SRT обеспечивает механизмы для обнаружения и восстановления потерянных пакетов данных, что делает его более надежным в условиях сетевых неполадок и потерь.

2. Адаптивность к сетевым условиям: SRT автоматически адаптируется к изменениям в сети, регулируя скорость передачи данных для обеспечения оптимальной производительности.

3. Защищенность данных: SRT предоставляет возможность для шифрования данных, обеспечивая безопасную передачу потоковых данных через открытые сети.

Недостатки:

1. Некоторую сложность настройки: настройка SRT может потребовать дополнительных усилий и экспертизы, особенно в случае нестандартных или сложных сетевых конфигураций.

2. Зависимость от поддержки устройств: SRT требует поддержки со стороны оборудования, включая БПЛА и приемное оборудование, чтобы обеспечить совместимость и правильную работу протокола.

3. Возможные накладные расходы: внедрение SRT может потребовать дополнительных ресурсов, включая высокоскоростные сети или дополнительное оборудование для обеспечения оптимальной производительности.

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. Каляев А. И., Коровин Я. С. Комплекс обнаружения и поражения БПЛА-нарушителей с помощью БПЛА-перехватчиков // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 3-4(153-154). С. 101-107. EDN GMUUD.
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. Балащенко, Н. А. Горыня, А. С. Гунько, В. И. Никонов // Динамика систем, механизмов и машин. 2022. Т. 10, № 1. С. 14-17. DOI 10.25206/2310-9793-2022-10-1-14-17. EDN ХНЕНРМ.
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 г. Анапа, 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 apply-

ing the technology acceptance model // *Forest Policy and Economics*. 2023. 157. P. 103077. doi: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. doi: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. doi: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. DOI 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. DOI 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; 26(4): 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; 26(4): 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. DOI 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. DOI 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. DOI 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. DOI 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. Vol. 19, No. 1. P. 73-86. DOI 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. DOI 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 мая 2021 года. Virtual, Glasgow, 2021. P. 9460041. DOI 10.1109/I2MTC50364.2021.9460041. EDN HYQCOI.

References

1. Kaljaev A. I., Korovin Ja. S. Kompleks obnaruzhenija i porazhenija BPLA-narushitelej s pomoshh'ju BPLA-perehvatchikov [Complex for detecting and defeating intruder UAVs using interceptor UAVs]. *Voprosy oboronnoj tehniki. Serija 16: Tehnicheskie sredstva protivodejstvija terrorizmu = Questions of Defense Technology. Series 16: Technical Means of Countering Terrorism*, 2021, no. 3-4(153-154), pp. 101-107. EDN GMUUOD.

2. Ablec A. A., A Strebkov. 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' = Military Thought*, 2022, no. 6, pp. 137-146. EDN ISYTIR.

3. Penskoj I. S., Rogozin O. V. Nejro-nechetkij PID-reguljator v zadache uglovoj stabilizacii mul'tirotnogo BPLA [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, no. 21, pp. 320-327. EDN XNRSJV.

4. Balashenko I. N., Gorynja N. A., Gun'ko A. S., Nikonov V. I. Aktual'nye voprosy upravlenija gruppoy BPLA [Topical issues of UAV group management]. *Dinamika sistem, mehanizmov i mashin = Dynamics of Systems, Mechanisms and Machine*, 2022. vol. 10, no. 1, pp. 14-17. DOI 10.25206/2310-9793-2022-10-1-14-17. – EDN XHEHPM.

5. Podoplekin Ju. F., Tolmachev S. G., Sharov S. N. Informacionno-upravljajushhaja sistema privedenija bespilotnyh letatel'nyh apparatov na dvizhushheesja sudno [Information and control system for bringing unmanned aerial vehicles to a moving vessel]. *Informacionno-upravljajushhie sistemy = Information and Control Systems*, 2012, no. 3(58), pp. 22-28. EDN OYIGWZ.

6. Silkin A. A., Ivanovskij A. N., Chernyj S. G. [Automated UAV control system within the local positioning system]. *Sostojanie i perspektivy razvitija sovremennoj nauki po napravleniju "Robototekhnika": Sbornik statej IV Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii* [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, 2022, pp. 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, p. 103077. doi: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. doi: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. doi:10.1016/j.trd.2023.103831.
10. Kutahov V. P., Meshherjakov R. V. Upravlenie gruppovym povedeniem bespilotnyh letatel'nyh apparatov: postanovka zadachi primeneniya tehnologij iskusstvennogo intellekta [Management of group behavior of unmanned aerial vehicles: setting the task of using artificial intelligence technologies]. *Problemy upravleniya = Problems of Management*, 2022, no. 1, pp. 67-74. DOI 10.25728/pu.2022.1.5. EDN J LXUXI.
11. Meshherjakov R. V., Iljuhin B. V. Obzor sorevnovatel'noj robototekhniki. Sostjazaniya sportivnyh robotov [Review of competitive robotics. Combinations of sports robots]. *Robototekhnika i tehničeskaja kibernetika = Robotics and Technical Cybernetics*, 2022, vol. 10, no. 4, pp. 255-260. DOI 10.31776/RTCJ.10402. – 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, vol. 7, pp. 110035-110049. DOI 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, pp. 51-61. DOI 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, pp. 162-174. DOI 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, pp. 93-113. DOI 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, Vol. 19, no. 1, pp. 73-86. DOI 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, vol. 102, no. 1. DOI 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, 17–20 maja 2021 goda. Virtual, Glasgow, 2021, 9460041 p. DOI 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

Шипаренко 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. Shiparenko, Student, State University of Marine and River Fleet named after admiral S.O. Makarov, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: nikita4shap@gmail.com

Чупаков Максим Викторович, начальник научно-исследовательской лаборатории, Черноморское высшее военно-морское училище имени П.С. Нахимова, г. Севастополь, Российская Федерация, e-mail: maxim.vor2012@yandex.ru

Maksim V. Chupakov, Head of the Research Laboratory, Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov, Sevastopol, Russian Federation, e-mail: maxim.vor2012@yandex.ru

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). Пристательные 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>.