

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

**Юго-Западного
государственного
университета**

Научный журнал

Том 26 № 3 / 2022

Proceedings

**of the Southwest
State University**

Scientific Journal

Vol. 26 № 3 / 2022



**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: 05.13.05; 2.3.1; 2.3.2; 2.3.3; 2.3.4; 2.3.6; 1.2.2.

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:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

Бхатгачарья Сиддхартха PhD, профессор, ректор Раджнагар Махалавидья (филиал Университета Бурдвана) (Индия);

Бьянко Лино, д-р философии (PhD), профессор международной академии архитектуры, профессор Университета архитектуры, строительства и геодезии (г. София, Болгария), старший преподаватель Университета Мальты (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, профессор РАН, 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, Юго-Западный государственный университет (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);

Грабовый Кирилл Петрович, Московский государственный строительный университет (национальный исследовательский 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 Рашит Абдулхакович, д-р техн. наук, профессор, Московский политехнический университет (г. Москва, Россия);

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

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Адрес учредителя, издателя и редакции:

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

Телефон: +7(4712) 22-25-26,

Факс: +7(4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (ПИ №ФС77-42691 от 16.11.10).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

Префикс DOI: 10.21869

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

© Юго-Западный государственный университет, 2022



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 30.09.2022.

Дата выхода в свет 16.11.2022. Формат 60x84/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 19,6.

Тираж 1000 экз. Заказ 86.

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: 05.13.05; 2.3.1; 2.3.2; 2.3.3; 2.3.4; 2.3.6; 1.2.2..

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

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

EDITORIAL BOARD

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

Bhattacharya Siddhartha PhD, Professor, Rector of Rajnagar Mahalavidya (Burdwan University Branch) (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);

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

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

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

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);

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

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

Roman V. Meshcheryakov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, 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);

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

Grabovoy P. Kirill, 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);

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
(ПИ №ФЦ77-42691 of 16.11.10).

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, 2022



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

Singed to print 30.09.2022.

Release date 16.11.2022. Format 60x84/8.

Offset paper. Printer's sheets 19,6.

Circulation 1000 copies. Order 86.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

Метод определения ориентации контакт-детали при автоматизации технологического процесса пайки	8
<i>Яцун С.Ф., Мальчиков А.В., Кочергин О.Б.</i>	

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

Анализ «мостиков холода» с целью выявления недостатков монолитного домостроения в г. Воронеже	21
<i>Сотникова О. А., Целярицкая М. И., Пащенко Ю. О.</i>	
Замковый механизм для соединения элементов съемной опалубки	35
<i>Гречухин А. Н., Куц В. В., Павлов Д.А.</i>	

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

Управление запасами в цепях поставок на основе линейной дискретной системы с квадратичным критерием качества	47
<i>Белоусова Е.П., Булгакова И.Н.</i>	
Моделирование совместного движения роботизированного буксировщика и самолёта с помощью сигналов оптронной матрицы	63
<i>Афонин Д. В., Печурин А. С., Яцун С. Ф.</i>	
Метод определения источника сообщений на основе обработки времени их поступления	81
<i>Таныгин М. О., Плугатарев А. В., Егоров С. И., Локтионов А. П.</i>	
Балансировка нагрузки данных в распределенной сети через прокси-сервер Nginx	98
<i>Никишин К. И.</i>	
Построение системы автоматического управления шаровой мельницей с применением наблюдателя возмущений и виртуального анализатора.....	112
<i>Закамалдин А. А., Шилин А. А.</i>	
Подход и алгоритм оценки допустимых значений отношения сигнал/шум лидаров роботов в условиях внешних воздействий	129
<i>Мамченко М.В.</i>	
Базовые элементы методологии снижения расхода остаточного ресурса вычислительных устройств систем распределенных вычислений на основе туманных и краевых вычислений.....	151
<i>Клименко А. Б.</i>	
К сведению авторов	168

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

Method for Orientation Determining of the Detail for the Automated Soldering Technological Process 8

Yatsun S. F., Mal'chikov A. V., Kochergin O. B.

CONSTRUCTION

Original articles

Analysis of "Cold Bridges" in Order to Identify Shortcomings of Monolithic Housing Construction in Voronezh 21

Sotnikova O. A., Tselyaritskaya M. I., Pashchenko Y. O.

Locking Mechanism for Connecting Elements of Non-Removable Formwork 35

Grechukhin A. N., Kuts V. V., Pavlov D. A.

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

Inventory Management in Supply Chains Based on a Linear Discrete System with a Quadratic Quality Criterion 47

Belousova E. P., Bulgakova I. N.

Simulation of the Joint Movement of a Robotic-Towing Vehicle and an Aircraft Using Signals from an Optocoupler Matrix 63

Afonin D. V., Pechurin A. S., Yatsun S. F.

Method of Determining the Source of Messages Based on Processing the Time of Their Receipt 81

Tanygin M. O., Plugatarev A. V., Egorov S. I., Loktionov A. P.

Load Balancer of Data in a Distributed Network via Nginx Proxy Server 98

Nikishin K. I.

Control Strategy of Ball Mill Based on Disturbance Observer and a Virtual Analyzer of Overload 112

Zakamaldin A. A., Shilin A. A.

Approach and Algorithm for Evaluating the Allowed Signal/Noise Ratio of Robotic Lidars under External Influences 129

Mamchenko M. V.

The Basic Elements of Devices Resource Consumption Decreasing Methodology for Distributed Systems on the Basis of Fog- and Edge-Computing 151

Klimenko A. B.

Information of the authors 168

Метод определения ориентации контакт-детали при автоматизации технологического процесса пайки

С.Ф. Яцун ¹, А.В. Мальчиков ¹ ✉, О.Б. Кочергин 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. Разработка методики определения ориентации детали при автоматизированной пайке контактной группы, основанной на использовании комбинированной системы распознавания изображения.

Задачи. Анализ технологического процесса сборки детали и оценка возможности применения различных технологий ориентирования заготовок. Разработка последовательной методики ориентирования детали, включающей этап распознавания скругленной грани посредством системы технического зрения. Разработка алгоритма распознавания ориентации заготовки непосредственно по изображению детали и по контуру тени детали. Постановка натурных экспериментов на испытательном стенде, получение численных значений точности распознавания ориентации детали для различных алгоритмов.

Методы. Для решения задачи транспортировки и позиционирования исследуемых деталей используются методы перемещения, за счет контролируемой вибрации внутри разработанной системы направляющих и отсекателей. Для определения скругленной грани используются методы обработки и распознавания изображений: метод *k*-средних (*k-means*) для кластеризации исходного изображения, преобразование Хафа для поиска контура и др.

Результаты. В ходе исследования были разработаны два алгоритма распознавания ориентации детали по исходному изображению и изображению отбрасываемой деталью тени. В обоих случаях точность распознавания составила более 96%, однако при использовании камеры низкого разрешения, точность распознавания по контуру тени получилась выше и составила более 99%.

Заключение. Разработанная в рамках работы методика определения ориентации деталей, включающая этапы предварительной сортировки на этапе вибротранспортировки, этап поиска скругленной грани с использованием системы технического зрения, в том числе по контуру тени детали, позволяет получить высокую точность даже при использовании видеоборудования с низким разрешением.

Ключевые слова: автоматизация производства; система технического зрения; распознавание изображения; цифровизация; интеллектуализация.

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

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке программы стратегического развития вузов "Приоритет-2030".

Для цитирования: 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>.

Поступила в редакцию 20.06.2022

Подписана в печать 29.07.2022

Опубликована 30.09.2022

Method for Orientation Determining of the Detail for the Automated Soldering Technological Process

Sergey F. Yatsun ¹, Andrey V. Mal'chikov ¹ ✉, Oleg B. Kochergin ¹

² Southwest State University

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

✉ e-mail: zveroknnp@gmail.com

Abstract

Purpose of research. Development of a technique for determining the orientation of parts during automatic soldering of a contact group based on the assembly of a combined image recognition systems.

Methods. Analysis of the technological process of assembling a part and evaluating the possibility of using various technologies for orienting workpieces. Development of a consistent technique for orienting a part, including the stage of recognizing a rounded edge using a vision system. Development of an algorithm for recognizing the orientation of the workpiece directly from the image of the part and along the contour of the shadow of the part. Setting up full-scale experiments on a test bench, obtaining numerical values for the accuracy of recognizing the orientation of a part for various algorithms.

Methodology. To solve the problem of transportation and positioning of the studied parts, methods of movement are used, due to controlled vibration inside the developed system of guides and cutters. To determine the rounded edge, image processing and recognition methods are used: the k-means method for clustering the original image, the Hough transform for contour search, etc.

Results. In the course of the study, two algorithms for extracting details from the original image and the image of the shadows cast by the detail were developed. In the detection of an increased risk, more than 96%, however, when detecting sensitivity along the contour of the shadow, more than 99% were detected.

Conclusion. The technique for determining details developed within the framework of the work, including the stages of preliminary sorting according to the task of vibrotransportation, the stage of searching for a round face using a technical perspective system, including the contour of shadow details, makes it possible to obtain high accuracy even when assembling video equipment with a low level of detection.

Keywords: production automation; vision system; image recognition; digitalization; intellectualization.

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., 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>.

Received 20.06.2022

Accepted 29.07.2022

Published 30.09.2022

Введение

Сегодня в мире стремительно развиваются направления дигитализации, автоматизации и интеллектуализации сферы материального производства [1-2]. Создание высокотехнологичной промышленности, которая будет отвечать требованиям глобальной конкурентоспособности и эффективности, предполагает внедрение в техпроцессы киберфизических систем, объединяющих материальные и цифровые сущности. Одним из важнейших аспектов развития сквозных передовых промышленных технологий является внедрение «умной» промышленной сенсорики, интеллектуальных систем управления технологическими процессами и средств робототехники [3-5]. Переход к автоматизированным производственным линиям отвечает требованиям цифровой трансформации и позволяет встраивать отдельные техпроцессы в единую информационную систему цеха или фабрики в целом. Ключевым преимуществом интеллектуальных автоматизированных линий, в отличие от традиционных средств автоматизации, является возможность быстрой настройки и переоборудования под новую технологическую задачу или тип выпускаемой продукции, в том числе в автоматическом или полуавтоматическом режиме.

Использование систем предиктивной настройки и диагностики с использованием моделей объектов и алгоритмов анализа и прогнозирования, адаптивных измерительных и управляющих систем, позволяет сократить время и затраты на наладку оборудования, повысить качество конечного продукта.

В рамках настоящей статьи рассматривается задача автоматизации типовой технологической цепочки сборки контактного узла электротехнического оборудования. Несмотря на вполне конкретный характер описываемого в данном примере процесса, предлагаемые авторами идеи могут быть легко перенесены на множество других технологических операций в рамках промышленного производства.

Целью работы является анализ возможности применения современных цифровых технологий, для повышения эффективности технологических процессов на примере автоматизированной производственной линии сборки контактного электромеханического узла. Разработка методики распознавания ориентации деталей с использованием теневых проекций.

Материалы и методы

В качестве примера в рамках работы рассматривается типовая задача

сборки контактного узла, состоящего из мостика и контакта соединяемых посредством пайки с предварительным нанесением легкоплавкого припоя. Часто подобные операции выполняются вручную на аппаратах для контактной сварки с предварительно настроенными, часто эмпирически, параметрами. Детали перемещаются и позиционируются перед пайкой непосредственно работником, часто с использованием дополнительной оснастки в виде кондукторов или направляющих. Точность позиционирования,

правильность ориентации детали и другие параметры сборки определяются квалификацией рабочего, его текущим психофизиологическим состоянием и в общем случае не могут быть гарантированы [6-8]. Внедрение средств автоматизации позволит повысить точность, повторяемость и производительность технопераций [9-15].

С целью автоматизации процесса сборки детали предлагается алгоритм, состоящий из отдельных этапов, показанных на рис. 1.

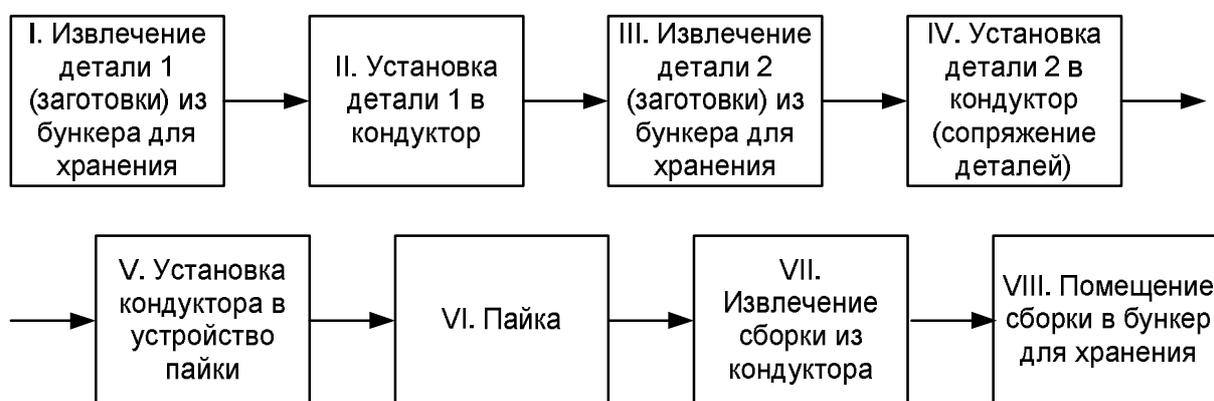


Рис. 1. Схема последовательности этапов сборки детали

Fig. 1. The sequence scheme of the assembly stages of the part

В рамках данного исследования рассматривается 3 этап – извлечение деталей для дальнейшего сопряжения. Особенность формы и размеров детали требует использования интеллектуальных методов, позволяющих идентифицировать контур детали и в случае неправильной ориентации вернуть ее в вибробункер.

В качестве примера детали рассмотрим контакт КМК-А33Б (ТУ 3498-009-

73030523-95 ЦП 050730 ГОСТ 3884-77)¹. Данная контакт-деталь изготовлена из серебросодержащего сплава методом твердофазного спекания и предназначена для применения в электрических коммутационных аппаратах для замы-

¹ ГОСТ 3884-77. Контакт-детали для коммутационных электрических аппаратов. Национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 3.02.77 N 287. Москва: Стандартинформ. Текст: непосредственный.

кания и размыкания электрических цепей. Контакт имеет цилиндрическую рабочую поверхность и плоскую нерабочую поверхность. Геометрическая форма и размеры показаны на рис.2.

Как видно из рис. 2 деталь имеет сложную пространственную форму и применение вибропитателей, оснащенных направляющими и отсекающими не дадут гарантированной ориентации детали на выходе. Наибольшую трудность представляет определение скругленной грани, так как разница в высоте детали по центру и с края менее 0,5мм. В каче-

стве одного из решений предлагается использовать систему технического зрения, которая будет отслеживать именно скругленную грань и в случае неправильной ориентации детали формировать команду для возвращения детали в вибробункер. Обратим внимание, что задачу предварительного ориентирования, а именно: по высоте и ширине, будем решать с помощью оснастки вибробункера. Таким образом, процесс ориентирования детали может быть представлен схемой, показанной на рис. 3.

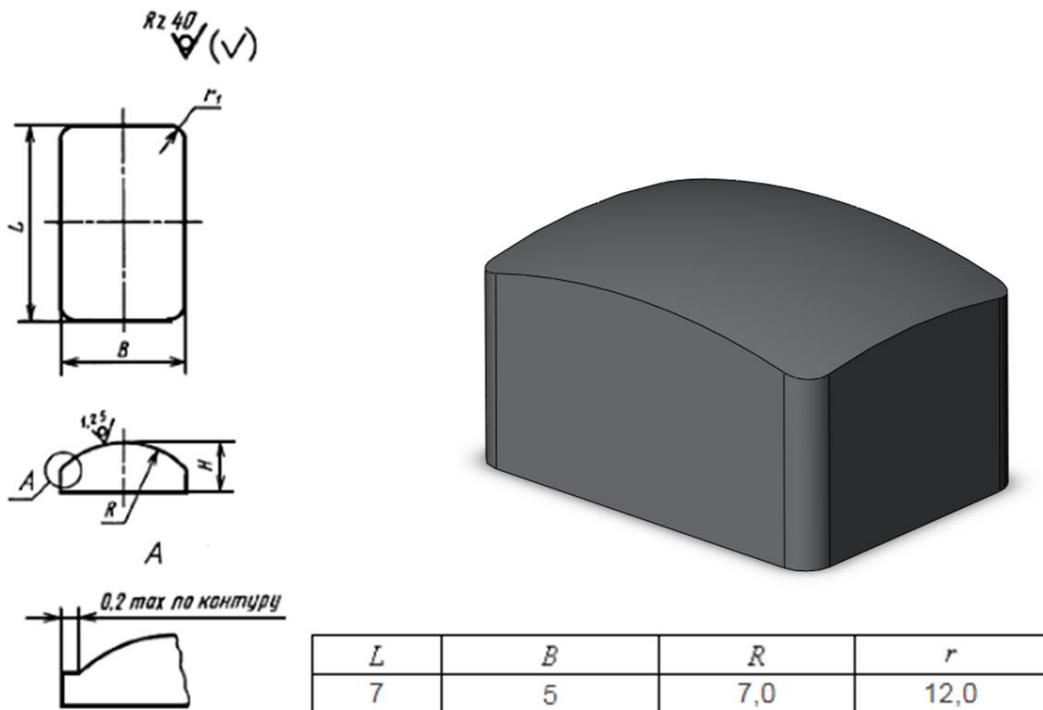


Рис. 2. Внешний вид и размеры детали контакта

Fig. 2. Appearance and dimensions of the contact part

Контакт-детали загружаются на дно вибробункера «навалом» без предварительной ориентации. Далее за счет вибрации детали перемещаются по винтообразному лотку к вершине бункера.

Использование направляющих и ограничителей с конфигурацией соответствующей конфигурации деталей позволяет отделять детали с неправильной ориентацией.

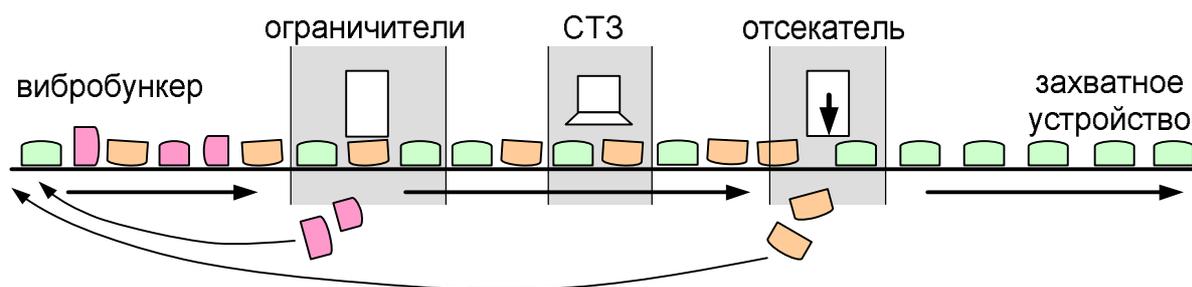


Рис. 3. Схема процесса классификации деталей

Fig. 3. Schematic of the part classification process

Далее детали цепочкой поступают на следующий этап классификации, где с использованием системы технического зрения (СТЗ) происходит определение правильности ориентации. Специализированное устройство отсекающего (пневматического типа) позволяет извлекать неправильно сориентированные детали и воз-

вращать их в бункер. Таким образом, к направляющим захватного устройства детали подаются с правильной ориентацией.

Рассмотрим подробно процесс определения правильной ориентации деталей с помощью СТЗ. Для этого приведем схему процесса измерения, показанную на рис.4,а.

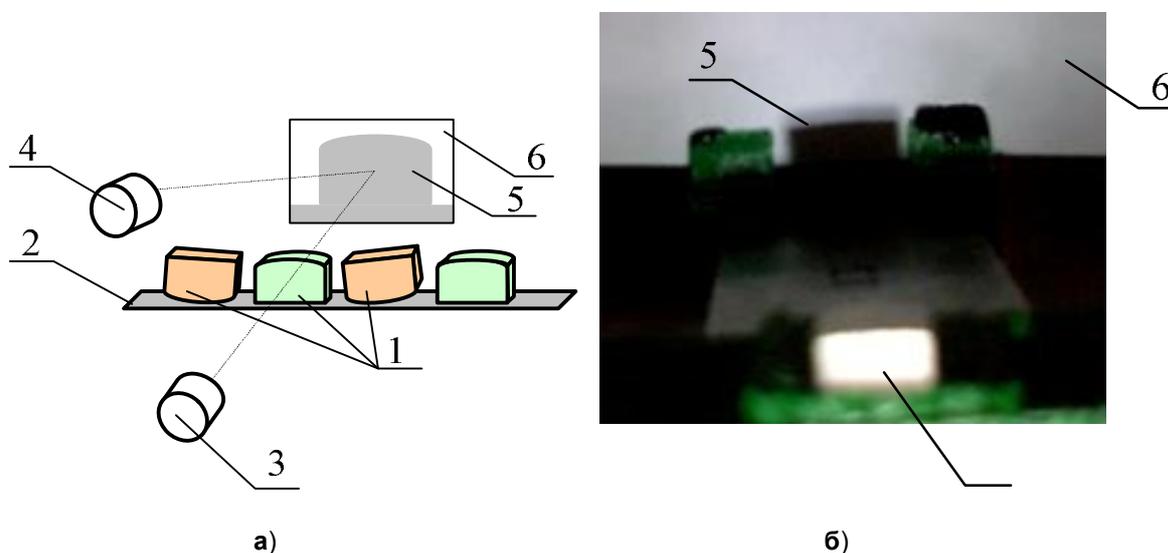


Рис. 4. Получение изображений контакт-детали: а – схема установки; б – изображение с камеры

Fig. 4. Obtaining images of the contact detail: а - installation scheme; б – image from the camera

На данном рисунке приняты следующие обозначения: 1 – исследуемая деталь; 2 – вибродорожка; 3 – камера; 4 – точечный источник света; 5 – теневая проекция; 6 – экран.

Особенностью предлагаемого метода является то, что ориентация детали 1 определяется как непосредственно по контуру детали в кадре, так и по контуру тени 5, оставляемой на экране 6. Для

этого в системе помимо камеры 3, используется точечный источник света 4.

На рис. 4,б показано изображение, полученное посредством камеры 4, установленной напротив детали. Небольшие размеры детали, не позволяют получить четкого изображения без использования дополнительной оптики, а также в измерения вносят погрешность движения детали, происходящие при перемещении детали вдоль направляющих вибрирующего лотка. Как хорошо видно

при использовании камеры низкого разрешения с параметрами, представленными в табл. 1, получить четкий контур изображения не представляется возможным, а существующие методы фильтрации вносят значительные искажения в результаты определения контура.

Для детального изучения процесса получения изображения, калибровки и отладки, был разработан экспериментальный стенд, показанный на рис.5.

Таблица 1. Параметры камеры

Table 1. Camera parameters

Тип матрицы / Matrix Type	CMOS
Разрешение матрицы	1.3 Мп
Разрешение при съемке видео	1280x1024
Разрешение при съемке фото	1280x1024
Частота кадров	30 кадров/с

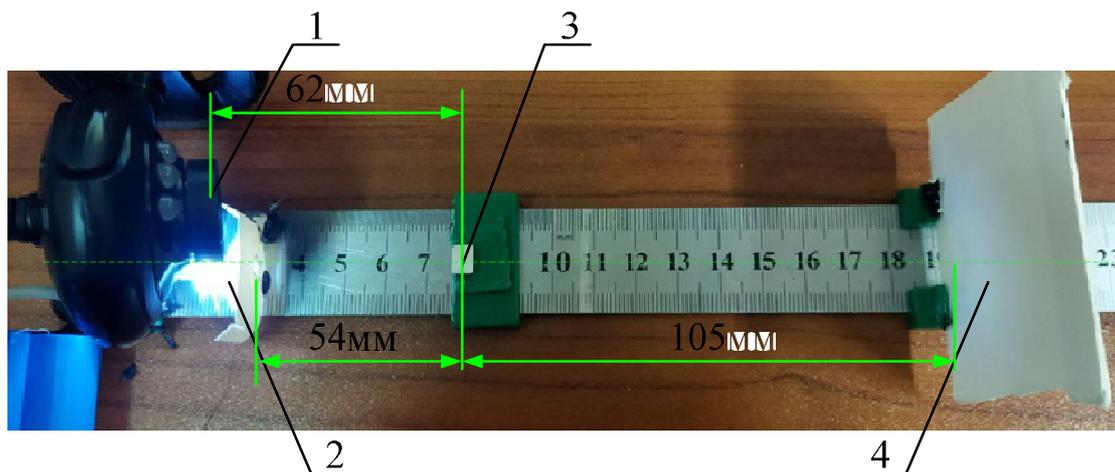


Рис. 5. Внешний вид экспериментального стенда в процессе калибровки СТЗ

Fig. 5. Appearance of the experimental stand during the calibration of the MV

На данном рисунке: 1 – камера, 2 – источник света, 3 – исследуемая деталь, 4 – экран для теневой проекции.

Использование стенда позволило экспериментально определить наилучшие параметры расстояния источника

света, камеры и экрана относительно детали, при которых контур изображения получается наиболее четким (численные значения расстояний показаны на рис. 5).

Рассмотрим алгоритм распознавания ориентации на примере изображения тени контакт-детали (рис. 6).

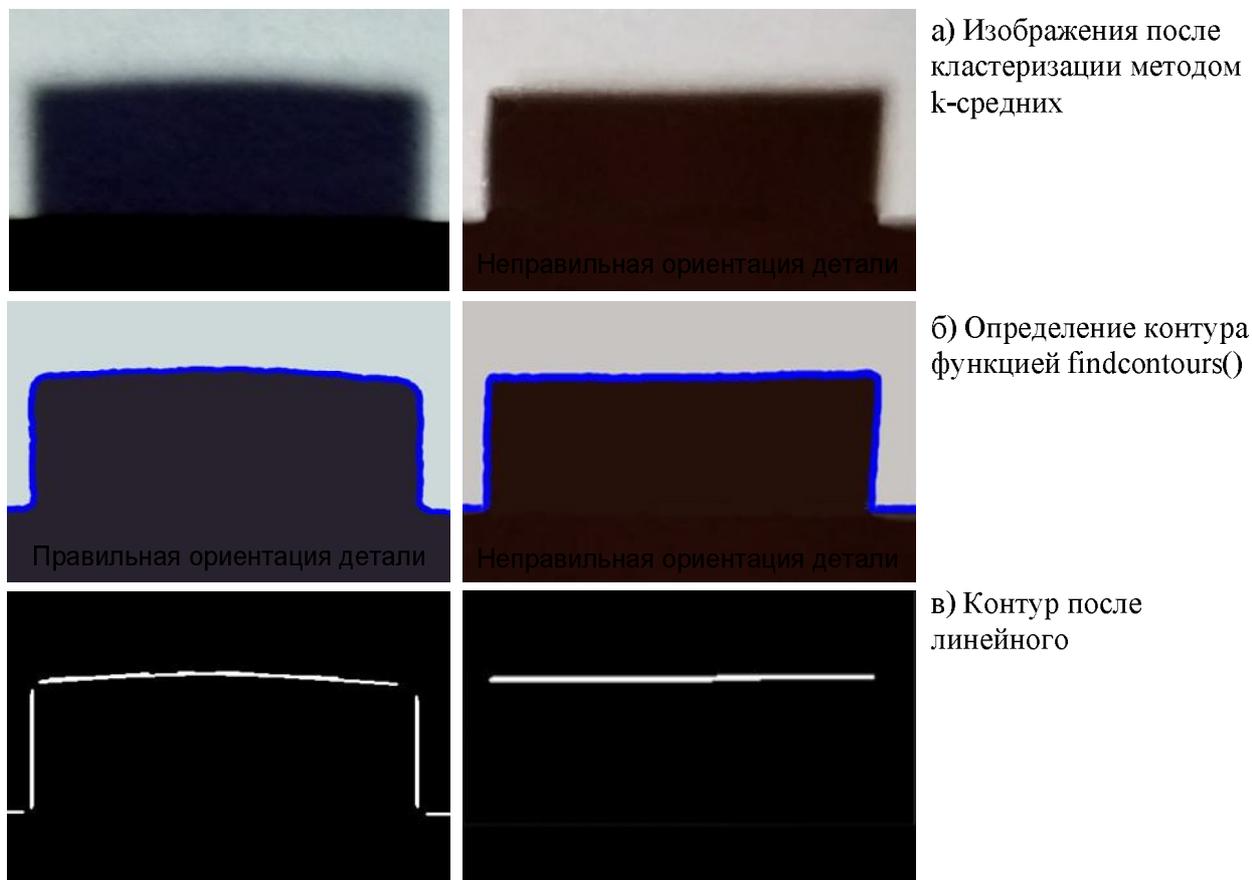


Рис. 6. Результаты обработки изображения и получение контура тени детали

Fig. 6. Results of image processing and obtaining the contour of the shadow of the part

На рис. 6,а показаны изображения тени деталей с правильной и неправильной ориентацией, обратим внимание, что на начальном этапе изображение обрезается до необходимого размера, убираются ненужные изображения направляющих, границ экрана, и т.д. Далее применяется метод k-средних (k-means) для кластеризации исходного изображения, позволяющих оставить на изображении только 2 цвета [16-17].

После предварительной обработки определяется исходный контур детали. В рамках исследования применялись методы findcontours (рис.6,б) [18] и линейное преобразование Хафа (рис.6,в) [19]. Оба метода реализованы в библиотеке openCV. Данные методы позволяют получить очертания объекта в кадре.

Так как положения камеры и детали всегда одинаковые, что обеспечивается направляющими, эквализация контуров

(приведение к единой длине) не требуется. Следующим шагом осуществляется поиск шаблона, максимально похожего на данный контур. Результатом вычислений является значение 1 (деталь ориентирована правильно, выпуклостью вверх) или 0 (деталь ориентирована неверно, плоской гранью вверх). Описанным методом были исследованы и непосредственно само изображение контактных деталей.

Результаты и их обсуждение

В рамках исследований, описываемых в настоящей статье, была проведена серия из 500 экспериментов. Каждый раз деталь устанавливалась в новое уникальное положение (в границах направляющих), при этом в журнал экспериментов вносились 3 значения распознавания ориентации (истинное, распознаваемое по тени, распознаваемое по прямому изображению).

В ходе исследований было установлено, что точность определения правильности положения по тени составила 99,2% (3 из 250 – были ложно распознаны как неправильно ориентированные, и 1 из 250 как правильно ориентированная). Для распознавания по прямому изображению точность соста-

вила 96,2% (12 из 250 – были ложно распознаны как неправильно ориентированные, и 7 из 250 как правильно ориентированная). Отметим, что при ложном определении правильно установленной детали, ошибка была при использовании тени и прямого изображения.

Как показали результаты исследований, использование теневой проекции детали, позволяет значительно повысить точность распознавания правильности ориентации детали небольших размеров при использовании камеры низкого разрешения и без использования специализированной оптики.

Выводы

В ходе исследований была выполнена схематизация автоматизированного процесса сборки контактной группы электротехнического оборудования. В рамках статьи рассмотрена задача распознавания правильности ориентации контакт-деталей перед установкой в захватное устройство и пайкой. Предложен метод определения контура детали по теневой проекции и экспериментально доказана его эффективность при сравнении с прямым изображением при использовании камеры низкого разрешения.

Список литературы

1. Алетдинова А. А. и др. Цифровая трансформация экономики и промышленности: проблемы и перспективы. СПб., 2017.
2. Плотников В. А. Цифровизация производства: теоретическая сущность и перспективы развития в российской экономике // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2018. №. 4 (112). С. 16-24.

3. Иванов Д. А., Иванова М. А., Соколов Б. В. Анализ тенденций изменения принципов управления предприятиями в условиях развития технологий Индустрии 4.0 // Информатика и автоматизация. 2018. Т. 5. №. 60. С. 97-127.
4. Bahrin M. A. K. et al. Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic // Jurnal teknologi. 2016. Т.78. С.6-13. <https://doi.org/10.11113/jt.v78.9285>
5. Зозуля Д. М. Цифровизация российской экономики и Индустрия 4. 0: вызовы и перспективы // Вопросы инновационной экономики. 2018. Т. 8. №. 1. С. 1-14.
6. Шаталова Н. И. Психофизиологические особенности трудового поведения работника // Вестник НГУЭУ. 2015. №. 1. С. 178-189.
7. Данилова Н. Н. Психофизиология. М.: Аспект Пресс, 2012.
8. Сорокин Г. А., Шилов В. В. Оценка годового прироста риска нарушения здоровья работников при высокой интенсивности труда // Гигиена и санитария. 2020. Т. 99. №. 6. С. 618-623.
9. Цветаев С. С., Логачев К. И. Актуальные проблемы автоматизации промышленных предприятий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. №. 1. С. 87-89.
10. Мальчиков А. В. и др. Анализ эффективности применения экзоскелета в производственном процессе промышленного предприятия // Юность и знания-гарантия успеха-2019. Курск, 2019. С. 234-237.
11. Vyatkin V. Software engineering in industrial automation: State-of-the-art review // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2013. Vol. 9. №. 3. P. 1234-1249. <https://doi.org/10.1109/TII.2013.2258165>
12. Xu H. et al. A survey on industrial Internet of Things: A cyber-physical systems perspective // Ieee access. 2018. Vol. 6. P. 78238-78259. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2884906>
13. 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. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208173>
14. Malchikov A. et al. Control features of the electromechanical system with end-effector considering the regulated torque // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2017. Vol. 113. P. 02001. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201711302001>
15. 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. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111876>
16. Hossain M. Z. et al. A dynamic K-means clustering for data mining // Indonesian Journal of Electrical engineering and computer science. 2019. Vol. 13. №. 2. P. 521-526.
17. Sinaga K. P., Yang M. S. Unsupervised K-means clustering algorithm // IEEE access. 2020. Vol. 8. P. 80716-80727. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988796>

18. Chandan G. et al. Real time object detection and tracking using Deep Learning and OpenCV //2018 International Conference on inventive research in computing applications (ICIRCA). IEEE, 2018. P. 1305-1308. [https://doi.org/ 10.1109/ICIRCA.2018.8597266](https://doi.org/10.1109/ICIRCA.2018.8597266)
19. Wang J., Fu P., Gao R. X. Machine vision intelligence for product defect inspection based on deep learning and Hough transform //Journal of Manufacturing Systems. 2019. Vol. 51. P. 52-60. [https://doi.org/ 10.1016/j.jmsy.2019.03.002](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.03.002)

References

1. Aletdinova A. A. et al. *Tsifrovaya transformatsiya ekonomiki i promyshlennosti: problemy i perspektivy* [Digital transformation of the economy and industry: problems and prospects]. Saint-Petersburg. 2017.
2. Plotnikov V. A. Tsifrovizatsiya proizvodstva: teoreticheskaya sushchnost' i perspektivy razvitiya v rossiiskoi ekonomike [Digitalization of production: theoretical essence and prospects for development in the Russian economy]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta = Bulletin of the St. Petersburg State University of Economics*, 2018, no. 4 (112), pp. 16-24.
3. Ivanov D. A., Ivanova M. A., Sokolov B. V. Analiz tendentsii izmeneniya printsiptov upravleniya predpriyatiyami v usloviyakh razvitiya tekhnologii Industrii 4.0 [Analysis of trends in changing the principles of enterprise management in the context of the development of Industry 4.0 technologies]. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation*, 2018, vol. 5, no. 60, pp. 97-127.
4. Bahrin M. A. K. et al. Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. *Jurnal tekhnologi*, 2016, vol.78, pp.6-13. <https://doi.org/10.11113/jt.v78.9285>.
5. Zozulya D. M. Tsifrovizatsiya rossiiskoi ekonomiki i Industriya 4. 0: vyzovy i perspektivy [Digitalization of the Russian economy and Industry 4. 0: challenges and prospects]. *Voprosy innovatsionnoi ekonomiki = Issues of innovative economics*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 1-14.6.
6. Shatalova N. I. Psikhofiziologicheskie osobennosti trudovogo povedeniya rabotnika [Psychophysiological features of the worker's labor behavior]. *Vestnik NGUEU = Bulletin of the National State University of Economics*, 2015, no. 1, pp. 178-189.
7. Danilova N. N. *Psikhofiziologiya* [Psychophysiology]. Moscow, Aspect Press Publ., 2012.
8. Sorokin G. A., Shilov V. V. Otsenka godovogo prirosta riska narusheniya zdorov'ya rabotnikov pri vysokoi intensivnosti truda [Evaluation of the annual increase in the risk of health disorders of workers at high labor intensity]. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and Sanitation*, 2020, vol. 99, no. 6, pp. 618-623.

9. Tsvetaev S. S., Logachev K. I. Aktual'nye problemy avtomatizatsii promyshlennykh predpriyatii [Actual problems of automation of industrial enterprises]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova = Bulletin of the Belgorod State Technological University V.G. Shukhova*, 2012, no. 1, pp. 87-89.

10. Malchikov A.V. et al. Analiz effektivnosti primeneniya ekzoskeleta v proizvodstvennom protsesse promyshlennogo predpriyatiya [Analysis of the effectiveness of the use of an exoskeleton in the production process of an industrial enterprise]. *Yunost' i znaniya-garantiya uspekha = Youth and knowledge is a guarantee of success-2019*. Kursk, 2019, pp. 234-237.

11. Vyatkin V. Software engineering in industrial automation: State-of-the-art review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, vol. 9, no. 3, pp. 1234-1249. <https://doi.org/10.1109/TII.2013.2258165>

12. Xu H. et al. A survey on industrial Internet of Things: A cyber-physical systems perspective. *Ieee access*, 2018, vol. 6, pp. 78238-78259. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2884906>

13. 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. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208173>

14. Malchikov A. et al. Control features of the electromechanical system with end-effector considering the regulated torque. *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2017, vol. 113, pp. 02001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711302001>

15. 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. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111876>

16. Hossain M. Z. et al. A dynamic K-means clustering for data mining. *Indonesian Journal of Electrical engineering and computer science*, 2019, vol. 13, no. 2, pp. 521-526.

17. Sinaga K. P., Yang M. S. Unsupervised K-means clustering algorithm. *IEEE access*. 2020, vol. 8, pp. 80716-80727. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988796>

18. Chandan G. et al. Real time object detection and tracking using Deep Learning and OpenCV. *2018 International Conference on inventive research in computing applications (ICIRCA)*. IEEE, 2018, pp. 1305-1308. <https://doi.org/10.1109/ICIRCA.2018.8597266>

19. Wang J., Fu P., Gao R. X. Machine vision intelligence for product defect inspection based on deep learning and Hough transform. *Journal of Manufacturing Systems*, 2019, vol. 51, pp. 52-60. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.03.002>

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

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

Кочергин Олег Борисович, студент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: o-kochergin@bk.ru

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

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

Oleg B. Kochergin, Student, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: o-kochergin@bk.ru

Анализ «мостиков холода» с целью выявления недостатков монолитного домостроения в г. Воронеже

О. А. Сотникова¹ ✉, М. И. Целярицкая¹, Ю. О. Пащенко¹

¹ Воронежский государственный технический университет
ул. 20-летия Октября, д. 84, г. Воронеж 394006, Российская Федерация

✉ e-mail: ksenija.sotnikova@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. В данной статье проанализированы тепловизионные обследования жилых помещений в монолитных домах 2018-го и 2019-го гг. постройки в городе Воронеже. На основании нормативных требований Федерального закона №261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности» ставится вопрос о существующих недостатках в конструктивных узлах монолитного перекрытия, связанных с ошибками при проектировании и монтаже. Такие ошибки приводят к образованию мест, через которые происходят потери теплоты – «мостиков холода». «Мостики холода» ухудшают энергоэффективные свойства конструкций и провоцируют излишние затраты на эксплуатацию зданий.

Методы. В рассматриваемой статье используется метод тепловизионного обследования для бесконтактной диагностики «мостиков холода».

Результаты. Анализ термограмм основан на выявлении причин возникновения нарушений теплоизоляции наружных ограждающих конструкций или снижения ее качества. Основным критерием сравнения различных участков поверхности ограждающих конструкций является разница температур в выбранной точке на сравниваемом участке поверхности. Разница температур между температурой внутри помещения и температурой поверхности стены жилого дома по ул. 45-ой Стрелковой Дивизии превышает +6,0°C при нормируемом значении $\Delta t_n = +4,0^\circ\text{C}$. Разница температур между температурой внутри помещения и температурой поверхности стены жилого дома по улице Хользунова превышает +11,0°C при нормируемом значении $\Delta t_n = +4,0^\circ\text{C}$.

Заключение. Вышеприведенные результаты тепловизионного обследования позволяют сделать вывод, что по периметру консольных дисков перекрытий либо не были установлены термовкладыши, либо смонтированы с грубыми ошибками. Неконтролируемая потеря теплоты через зафиксированные «мостики холода» приводит к значительному увеличению расхода теплоты на отопление здания. Это противоречит закону № 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности». Исключить существующие мостики в эксплуатируемых квартирах достаточно трудозатратно. Целесообразно предотвратить их образование на стадии проектирования и при выполнении монтажных работ с помощью перфорации монолитной плиты перекрытия. Применение термовкладышей приводит к уменьшению удельных теплопотерь в среднем в 1,5 раза и практически исключает промерзание в стандартных условиях.

Ключевые слова: монолитное домостроение; «мостик холода»; теплоизоляционный вкладыш; тепловизионное обследование.

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

Для цитирования: Сотникова О. А., Целярицкая М. И., Пащенко Ю. О. Анализ «мостиков холода» с целью выявления недостатков монолитного домостроения в г. Воронеже // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(3): 21-34. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-21-34>.

Поступила в редакцию 27.07.2022

Подписана в печать 19.08.2022

Опубликована 30.09.2022

Analysis of "Cold Bridges" in Order to Identify Shortcomings of Monolithic Housing Construction in Voronezh

Olga A. Sotnikova ¹ ✉, Margarita I. Tselyaritskaya ¹, Yulia O. Pashchenko ¹

¹ Voronezh State Technical University
20-letiya Oktyabrya str. 84, Voronezh 394006, Russian Federation

✉ e-mail: ksenija.sotnikova@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. This article analyzes thermal imaging surveys of residential premises in monolithic houses built in 2018 and 2019 in the city of Voronezh. Based on the regulatory requirements of Federal Law No. 261-F3 "On Energy Saving and energy Efficiency improvement", the question is raised about the essential shortcomings in the structural units of the monolithic overlap associated with errors in design and installation. Such errors lead to the formation of places through which heat losses occur - "cold bridges". "Cold bridges" worsen the energy-efficient properties of structures and provoke excessive costs for the operation of buildings

Methods. In the article under consideration, the method of thermal imaging is used for non-contact diagnostics of "cold bridges".

Results. The analysis of thermograms is based on identifying the causes of violations of thermal insulation of external enclosing structures or a decrease in its qualities. The main criterion for comparing different surface areas of enclosing structures is the temperature difference at the selected point on the compared surface area. The temperature difference between the indoor temperature and the surface temperature of the wall of a residential building on the 45th Rifle Division Street exceeds +6.0 °C with a normalized value of $\Delta t_{ext} = +4.0$ °C. The temperature difference between the indoor temperature and the surface temperature of the wall of a residential building on Kholzunov Street exceeds +11.0 °C with a normalized value of $\Delta t_{ext} = +4.0$ °C.

Conclusion. The above results of the thermal imaging survey allow us to conclude that thermal pads were either not installed along the perimeter of the cantilever ceiling discs, or were mounted with gross errors. Uncontrolled loss of heat through fixed "cold bridges" leads to a significant increase in heat consumption for heating the building. This is contrary to Law No. 261-FZ "On Energy Conservation and Energy Efficiency Improvement". It is quite labor-intensive to eliminate existing bridges in operated apartments. It is advisable to prevent their formation at the design stage and during installation work by means of perforation of a monolithic floor slab. The use of thermal pads leads to a decrease in specific heat loss by an average of 1.5 times and practically eliminates freezing under standard conditions.

Keywords: monolithic housing construction; "cold bridge"; thermal insulation liner; thermal imaging examination.

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

For citation: Sotnikova O. A., Tselyaritskaya M. I., Pashchenko Y. O. Analysis of "Cold Bridges" in Order to Identify Shortcomings of Monolithic Housing Construction in Voronezh. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(3): 21-34 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2022-26-3-21-34](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-21-34).

Received 27.07.2022

Accepted 19.08.2022

Published 30.09.2022

Введение

Монолитное домостроение по ряду причин превалирует на фоне панельных и кирпичных зданий. Преимущества этого способа возведения зданий становятся особенно актуальными с принятием закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности»¹. Широкие возможности технологии монолитного домостроения позволяют решить актуальные проблемы в перспективе устойчивого развития строительной индустрии. Экологическое строительство, которое включает в себя решение комплекса задач, таких как архитектурные, строительные, экологические, градостроительные, экономические и социальные, имеет определение «устойчивое строительство».

Для решения экологической задачи устойчивого развития, необходимо минимизировать воздействие тепловлажностных дефектов строительных конструкций на эксплуатацию дома. Повреждения, определение которых визуаль-

но представляется возможным, подвергаются тепловизионной диагностике. Тепловизионные обследования выявляют так называемые «мостики холода».

«Мостики холода» – одни из самых распространенных повреждений строительных конструкций. Различают разнообразные типы «мостиков холода»: обусловленные конструктивными особенностями, свойствами материала конструкций, расположением (геометрией) [1]. Так геометрические «мостики холода» представляют собой стык однородных материалов со схожей плотностью, но диаметрально противоположными по величине коэффициента теплопроводности. Индикатором «мостиков холода» служат низкие показатели температур на поврежденных поверхностях, повышенные трансмиссионные потери и возникновение «точек росы».

Физические свойства материалов конструкций способствуют капиллярному перемещению в своей толще, а повышенная влажность создает благоприятные условия для тепловлажностных повреждений. Более того, отсутствие систематического проветривания помещения влечет за собой перенасыщение воздуха водяными парами. Избыток влаги в воздухе при опреде-

¹ Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от 23.11.2009 №261-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. 2009. № 261-ФЗ. Ст. 93.

ленной температуре не способен больше удерживаться и выделяется в форме капель воды. Температура, при которой это явление наблюдается, носит название температуры «точки росы». В этом случае относительная влажность воздуха составляет 100%.

В помещении существуют такие слои воздуха, которые имеют непосредственный контакт с более холодными поверхностями строительных элементов. Эти слои охлаждаются значительно быстрее других – до температуры поверхности [2]. Если в области «мостика холода» минимальная температура поверхности ниже температуры «точки росы», следовательно, и температура воздуха в этой зоне также ниже температуры «точки росы». В результате этого влага, содержащаяся в этом слое воздуха, выделяется в виде конденсата на холодной поверхности [3].

Стихийные теплопотери возможны в уязвимых местах, таких как углы помещений, стыки стен, узлы дверных и оконных проемов, балконы и выступающие плиты.

Ряд мер по повышению теплозащитных свойств, учет теплотехнической неоднородности, контроль качества строительно-монтажных работ – это то, что позволяет избежать образования «мостиков холода».

Материалы и методы

Избежать образования «мостиков холода» на стадии возведения монолитного дома – сложная задача, как правило

решением проблемы «утечки теплоты» занимаются после сдачи объекта в эксплуатацию, когда температура наружного воздуха достигает отрицательных значений [4]. Телевизор-современный прибор для диагностики строительных конструкций. Тепловизионное обследование – получение изображения объектов с помощью исходящего от них теплового (инфракрасного) излучения [5].

Метод тепловизионного обследования сконцентрирован на дистанционном измерении полей температур поверхностей ограждающих конструкций. Результатом является снимок в инфракрасном изображении. Тепловизор воспринимает электромагнитное излучение строительной конструкции: чем выше ее температура, тем она ярче. Вычисление сопротивлений теплопередаче и температур внутренних поверхностей ограждающих конструкций основано на фиксации разности температур между внутренней и наружной поверхностями ограждения.

Бесконтактная диагностика с применением тепловизионной технологии позволяет также выявить ошибки при проектировании и монтаже на ранних стадиях их образования, что снижает потребность в дорогостоящих мероприятиях по усилению конструкций [6, 7, 8, 9, 10].

Результаты и их обсуждение

Одной из основных задач теплосбережения и формирования комфортного микроклимата при эксплуатации жилого дома является создание эффективной

теплоизоляции наружных ограждающих конструкций. Уровень теплозащиты и параметры микроклимата в жилых помещениях регламентируются, соответственно нормативным документам СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» и ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях».

На стадии проектирования монолитного жилого дома предусматривают поэтажное опирание наружных стен на консольные выпуски дисков перекрытий. Этот способ подразумевает наиболее четкое разделение конструктивных элементов на несущие и ограждающие конструкции по функциональному на-

значению. Безусловно, наличие «мостиков холода» возможно в местах опирания наружной ограждающей конструкции на перекрытие [11, 12, 13].

На стадии монтажных работ предусматривают расположение термовкладышей по периметру с отступом от края на 100 мм [14].

Для сопряжений с плитой перекрытия минимальные температуры на внутренней поверхности стены зависят от толщины стены и наличия перфорации [15]. В узлах данного вида промерзание практически не наблюдается. Пример применения данного решения представлен на рис.1.



Рис. 1. Термовкладыши в монолитном перекрытии

Fig. 1. Thermal pads in a monolithic overlap

При соблюдении условий энергосбережения, обеспечения санитарно-гигиенических условий смоделируем изополя температур в программном обеспечении LIRA LAND (рис.2). За темпе-

ратуру внутреннего воздуха принято $t_{вн}=+20^{\circ}\text{C}$, температура наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью $0,92 t_{н} = - 24^{\circ}\text{C}$.

Минимальная температура в месте размещения теплопроводных включений не превышает нормируемый температурный перепад равный $\Delta t^{\text{н}}=+4^{\circ}\text{C}$, следовательно, санитарно-гигиеническое условие [7] выполнено. Приходим к выводу, что «мостики холода» отсутствуют.

Были выполнены экспериментальные исследования в жилых зданиях г. Воронеж по ул. 45-ой Стрелковой Дивизи

и ул. Хользунова при проведении которых использовался тепловизор TESTO 865 (серийный номер 62280818).

Обследование вышеупомянутых жилых домов, находящиеся в эксплуатации с 2019-го и 2018-го гг., проводилось бесконтактным способом.

Основные технические характеристики тепловизора TESTO 865 представлены в табл.1.

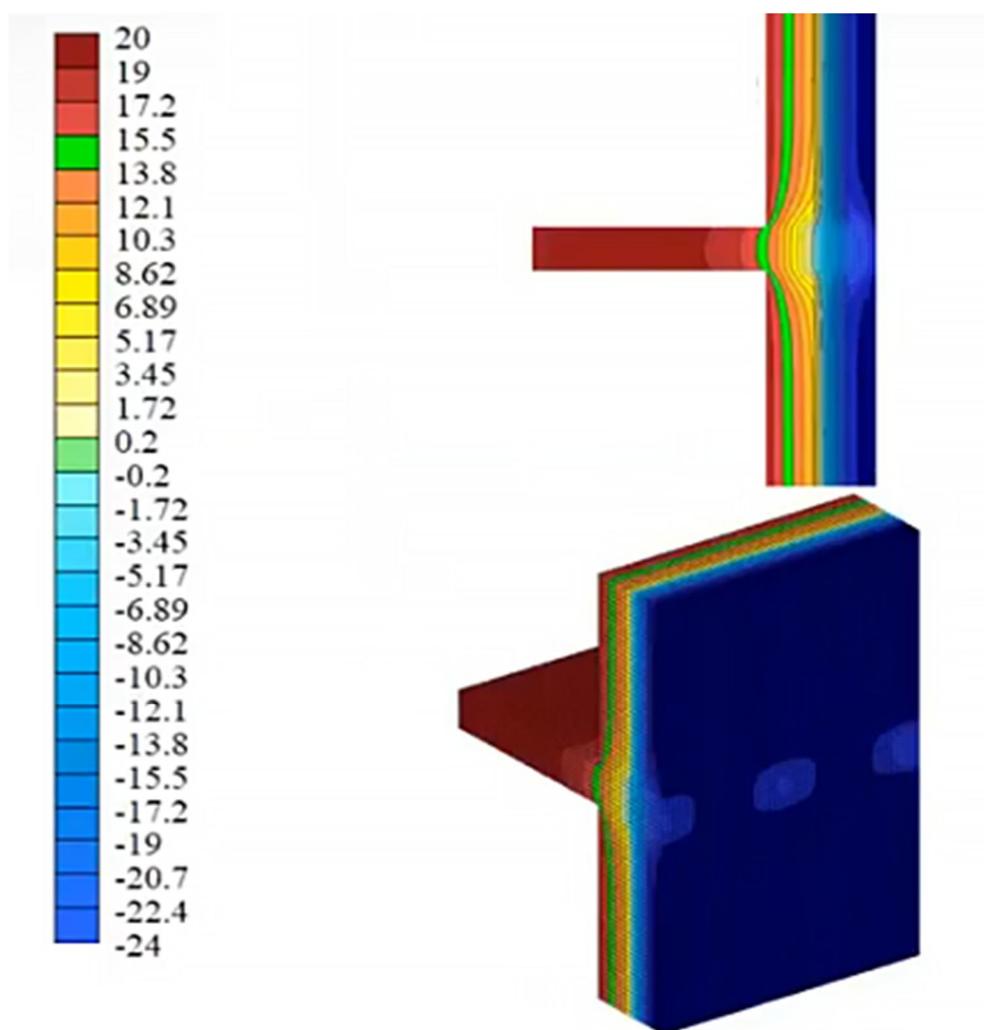


Рис. 2. Термографическая визуализация перфорации выпусков дисков монолитного перекрытия

Fig. 2. Thermographic visualization of perforation of monolithic overlap disk releases

Обзорное термографирование внутренних поверхностей ограждающих конструкций выполнялось в жилых поме-

щениях, имеющих характеристики, приведенные в табл.2.

Таблица 1. Технические характеристики TESTO 865**Table 1.** Technical characteristics of TESTO 865

№п/п	Наименование / Name	Значение / Meaning
1	Размер детектора, пикселей	160x120
2	Диапазон измерения температур, °С	от минус 20 до плюс 280 from minus 20 to plus 280
3	Температурная чувствительность (NETD), мК, не более	120
4	Рабочая температура, °С	от минус 15 до плюс 50 from minus 15 to plus 50
5	Точность измерения, °С, не более	2

Таблица 2. Характеристики исследуемых жилых зданий**Table 2.** Technical characteristics of TESTO 865

№ п/п	Местоположение / Location	Тип здания / Type of building	Ввод в эксплуатацию, год / Commissioning, year	Количество этажей / Number of floors	Температура наружного воздуха, °С / The temperature of the air on the gun, °С	Температура в жилом помещении, °С / Temperature in the living room, °С
1	ул. 45-й Стрелковой Дивизии	Монолитный	2019	25	минус 15,0 minus 15.0	плюс 22,5 plus 22.5
2	ул. Хользунова Holzunova str .	Кирпично-монолитный	2018	17	минус 14,0 minus 14.0	плюс 21,0 plus 21.0

Детальные замеры производились в перпендикулярном направлении к стене либо при отклонении, не превышающем 30°. Термографирование выполнялось последовательно, с покадровой записью термограмм и одновременным измере-

нием, и фиксацией температур реперных участков. На рис.3, 4, 5, 6 зона темного цвета обозначает область максимально пониженных значений температур на внутренней поверхности ограждения.

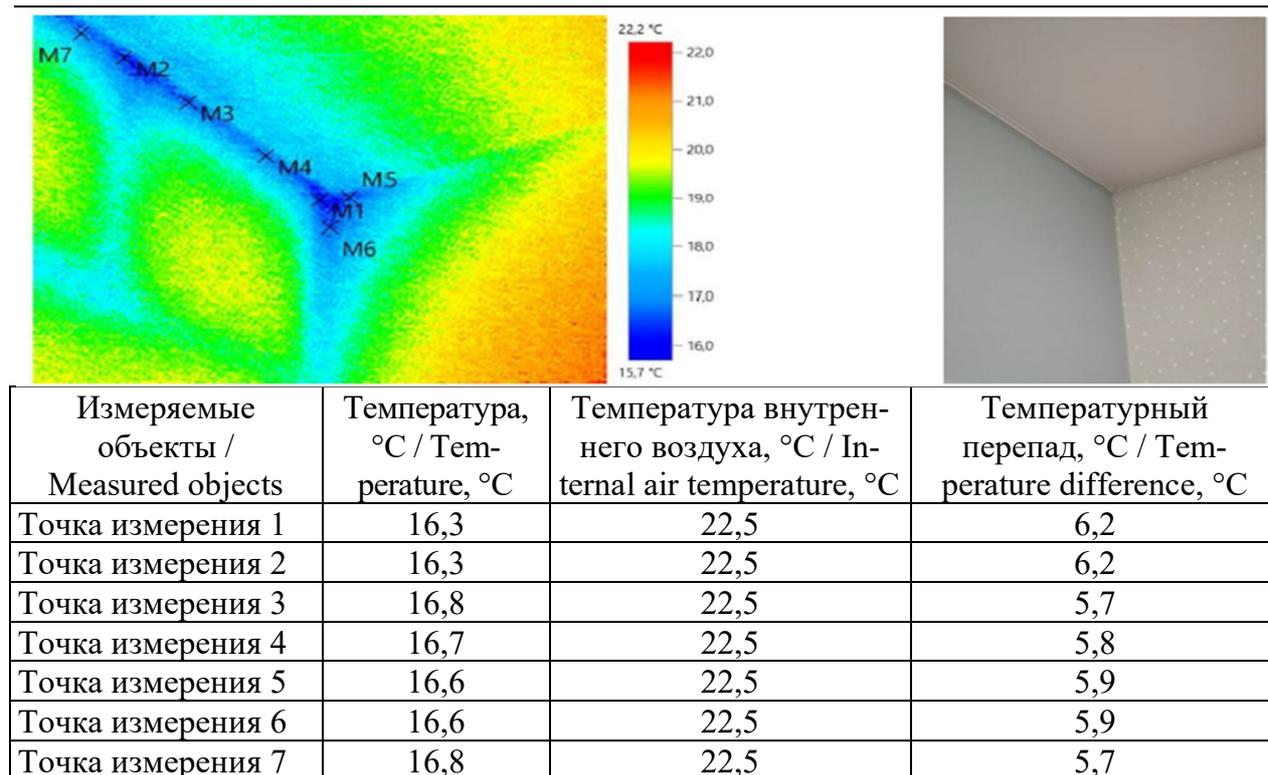


Рис. 3. Результаты тепловизионного обследования верхней зоны внешней стены жилого дома по ул. 45-ой Стрелковой Дивизии

Fig. 3. Results of thermal imaging examination of the upper zone of the outer wall of a residential building on the ul. 45 Strelkovoi Divizii

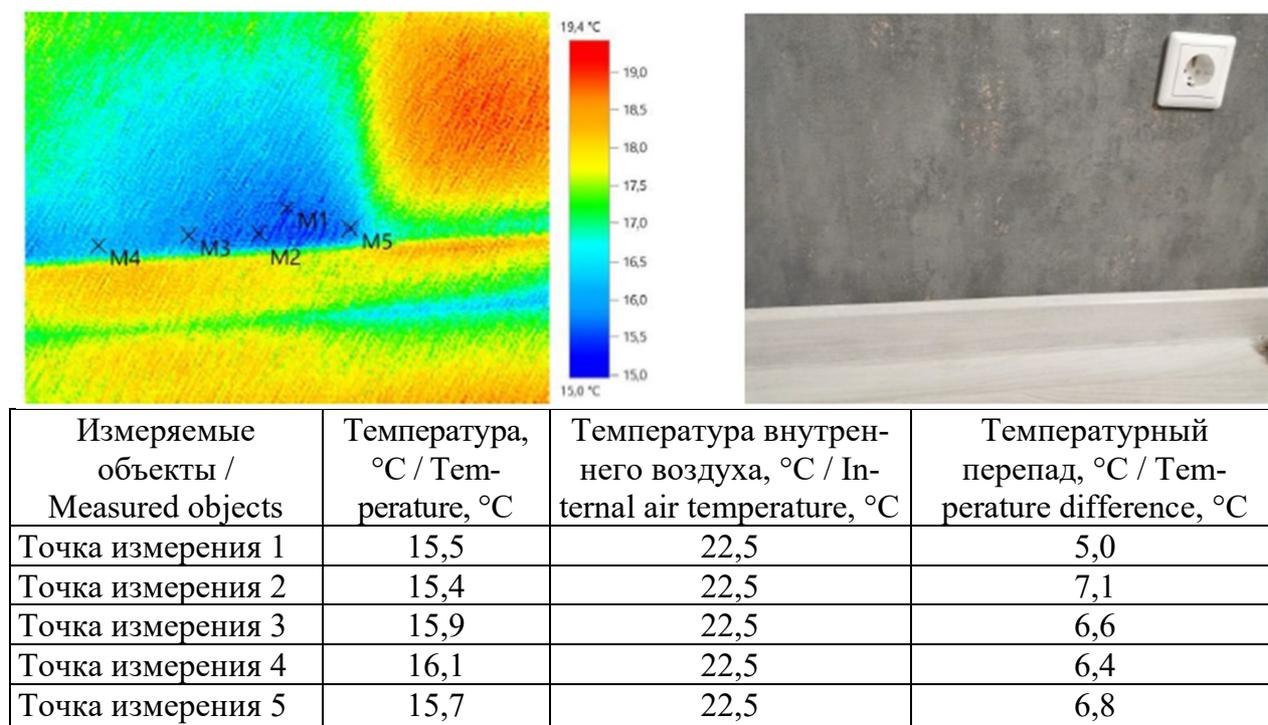
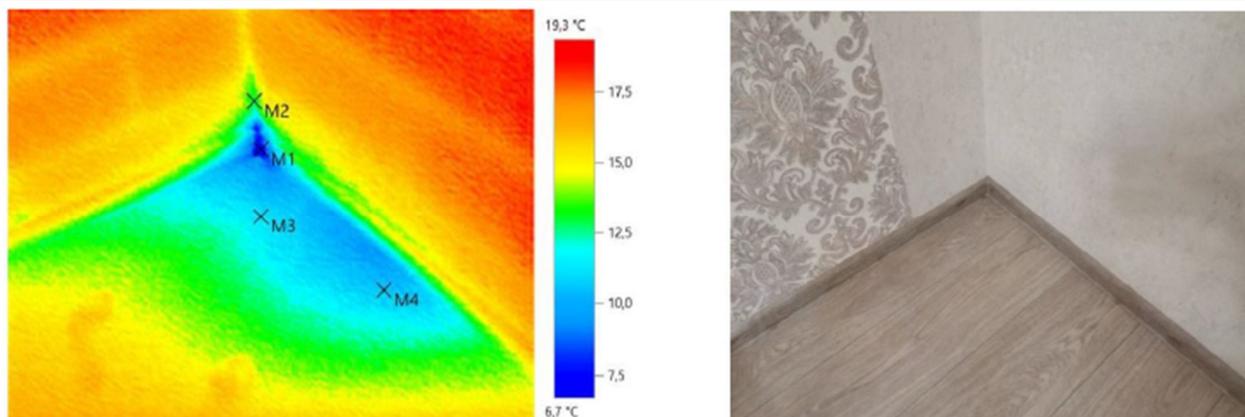


Рис. 4. Результаты тепловизионного обследования нижней зоны внешней стены жилого дома по ул. 45-ой Стрелковой Дивизии

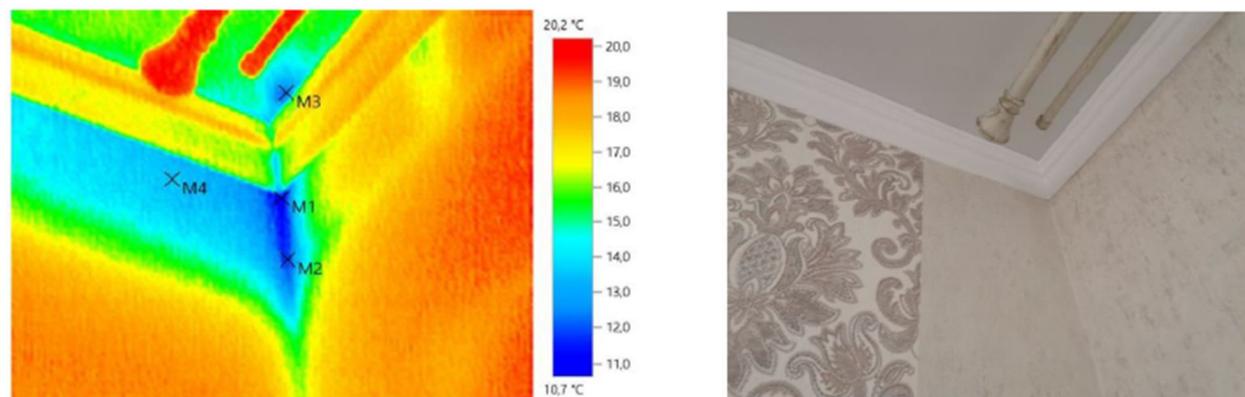
Fig. 4. Results of thermal imaging examination of the lower zone of the outer wall of a residential building on the ul. 45 Strelkovoi Divizii



Измеряемые объекты / Measured objects	Температура, °C / Temperature, °C	Температура внутреннего воздуха, °C / Internal air temperature, °C	Температурный перепад, °C / Temperature difference, °C
Точка измерения 1	7,0	21,0	14,0
Точка измерения 2	12,8	21,0	8,2
Точка измерения 3	11,2	21,0	9,8
Точка измерения 4	10,4	21,0	10,6

Рис. 5. Результаты тепловизионного обследования нижней зоны внешней стены жилого дома по ул. Хользунова

Fig. 5. Results of a thermal imaging survey of the lower zone of the outer wall of a residential building on ul. Holzunova



Измеряемые объекты / Measured objects	Температура, °C / Temperature, °C	Температура внутреннего воздуха, °C / Internal air temperature, °C	Температурный перепад, °C / Temperature difference, °C
Точка измерения 1	10,7	21,0	10,3
Точка измерения 2	11,7	21,0	9,3
Точка измерения 3	12,3	21,0	8,7
Точка измерения 4	13,7	21,0	7,3

Рис. 6. Результаты тепловизионного обследования верхней зоны внешней стены жилого дома по ул. Хользунова

Fig. 6. Results of thermal imaging examination of the upper zone of the outer wall of a residential building on ul. Holzunova

Выводы

Анализ термограмм основан на выявлении причин возникновения нарушений теплоизоляции наружных ограждающих конструкций или снижения ее качеств. Основным критерием сравнения различных участков поверхности ограждающих конструкций является разница температур в выбранной точке на сравниваемом участке поверхности.

Разница температур между температурой внутри помещения и температурой поверхности стены жилого дома по ул. 45-ой Стрелковой Дивизии превышает $+6,0^{\circ}\text{C}$ при нормируемом значении $\Delta t^{\text{н}}=+4,0^{\circ}\text{C}$. Разница температур между температурой внутри помещения и температурой поверхности стены жилого дома по улице Хользунова превышает $+11,0^{\circ}\text{C}$ при нормируемом значении $\Delta t^{\text{н}}=+4,0^{\circ}\text{C}$.

Вышеприведенные результаты тепловизионного обследования позволяют

сделать вывод, что по периметру консольных дисков перекрытий либо не были установлены термовкладыши, либо смонтированы с грубыми ошибками. Неконтролируемая потеря теплоты через зафиксированные «мостики холода» приводит к значительному увеличению расхода теплоты на отопление здания. Это противоречит закону № 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности». Исключить существующие мостики в эксплуатируемых квартирах достаточно трудозатратно. Целесообразно предотвратить их образование на стадии проектирования и при выполнении монтажных работ [2] с помощью перфорации монолитной плиты перекрытия. Применение термовкладышей приводит к уменьшению удельных теплопотерь в среднем в 1,5 раза и практически исключает промерзание в стандартных условиях [14].

Список литературы

1. Шеина С.Г., Миненко А.Н. Анализ и расчет "мостков холода" с целью повышения энергетической эффективности жилых зданий // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4-1(22). С. 131.
2. Алоян Р.М., Федосов С.В., Опарина Л.А. Энергоэффективные здания – состояние, проблемы и пути решения. Иваново: ПресСто, 2016. 276 с.
3. Егорова Т.С., Черкас В.С. Повышение энергоэффективности зданий благодаря устранению критических мостиков холода и непрерывной изоляции выступающих строительных конструкций // Вестник МГСУ. 2011. № 3-1. С. 421-428.
4. Шилова Е.А., Шилов С.О., В.А. Хакимова Экспериментальное определение уязвимых мест для образования "мостиков холода" // StudArctic Forum. 2017. №1(5). С. 93-98.

5. Мостики холода: современное решение проблемы / О.С. Никитина, Д.С. Максимцев, И.И. Харебин, Ю.В. Кузнецова // Современные тенденции развития науки и технологий. 2017. № 2. С. 134-136.
6. Голицын А.А. Глазом тепловизора // Наука из первых рук. 2014. № 3/4. С. 198-203.
7. Chang J.R., Yang S.R. Innovation and Sustainable Technology in Road and Airfield Pavement // Trans Tech Publications Ltd. Germany, 2013. С. 82-83.
8. Использование тепловизионного метода для осмотра зданий и посещения: обзор / А.С. Кавелин, А.Д. Тютин, В.Э. Нуриев, М.А. Колотенко // Инженерный вестник Дона. 2019. №6. С. 17-23.
9. Тетиор А.Н. Архитектурно-строительная экология. М.: Академия, 2008. 360 с.
10. Иванченко В.Т., Басов Е.В., Тришкина А.А. Создание оптимальной температурно-влажностной среды в жилых зданиях // Жилищное строительство. 2015. №8. С. 24-28.
11. Енюшин В.Н., Камалтдинова Э.М. Термографическое обследование каркасного дома // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. №2(16). С. 86-93.
12. Лукьянов В.И. Нестационарный массоперенос в строительных материалах и конструкциях при решении проблем повышения защитных качеств ограждающих конструкций зданий с влажным и мокрым режимом: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1993. 24 с.
13. Макеев М.Ф., Мельников Д. Е., Марченко М.И. Энергетическая эффективность объемно-планировочных решений многоквартирных жилых домов в разных климатических условиях // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. 2018. №3(32). С. 49-54.
14. ООО «ПЕНОПЛЭКС СПб» Термовкладыши ПЕНОПЛЭКС® – инновационный продукт для применения в монолитном домостроении/ «ПЕНОПЛЭКС СПб» ООО // Научно-технический и производственный журнал. 2017. № 8. С. 12-13.
15. Руденко Н.Н., Фурсова И.Н. Влияние нестационарных тепловых условий на определение термического сопротивления ограждения // Инженерный вестник Дона. 2013. №4(27). С. 225.
16. Кологерманская Е.М. Правовое регулирование использования возобновляемых источников энергии в российской федерации и зарубежных государствах: дис. ... канд. юрид. наук. М., 2020. 369 с.
17. Семенов В.С., Розовская Т.А. Повышение энергоэффективности ограждающих конструкций с применением облегченных кладочных растворов // Строительные материалы. 2015. №6. С. 16-19.

18. Characteristics and properties of lightweight concrete manufactured with cenospheres / F. Blanco, P. Garcia, P. Mateos, J. Ayala // *Cement and Concrete Research*. 2012. No. 30. P. 1715-1722.

19. Самарин О.Д., Тищенко И.И. Исследование регулируемых параметров в автоматизированных климатических системах в целях энергосбережения // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. №2(37). С. 13-18.

References

1. Sheina S.G., Minenko A.N. Analiz i raschet "mostkov kholoda" s tsel'yu povysheniya energeticheskoi effektivnosti zhilykh zdaniy [Analysis and calculation of "cold bridges" in order to increase the energy efficiency of residential buildings]. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*, 2012, no.4-1(22), 131 p.

2. Aloyan R.M., Fedosov S.V., Oparina L.A. *Energoeffektivnye zdaniya – sostoyanie, problemy i puti resheniya* [Energy-efficient buildings - state, problems and solutions]. Ivanovo, PresSto Publ., 2016, 276 p.

3. Egorova T.S., Cherkas V.S. Povyshenie energoeffektivnosti zdaniy blagodarya ustraneniyu kriticheskikh mostikov kholoda i nepreryvnoi izolyatsii vystupayushchikh stroitel'nykh konstruksii [Improving the energy efficiency of buildings by eliminating critical cold bridges and continuous insulation of exposed building structures]. *Vestnik MGSU = Vestnik MGSU*, 2011, no. 3-1, pp. 421-428.

4. Shilova E.A., Shilov S.O., Hakimova V.A. Khakimova Eksperimental'noe opredelenie uyazvimykh mest dlya obrazovaniya "mostikov kholoda" [Experimental determination of vulnerable places for the formation of "cold bridges"]. *StudArctic Forum*, 2017, no.1(5), pp. 93-98.

5. Nikitina O.S., Maksimtsev D.S., Kharebin I.I., Kuznetsova Yu.V. Mostiki kholoda: sovremennoe reshenie problemy [Bridges of cold: a modern solution to the problem]. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii = Modern Trends in the Development of Science and Technology*, 2017, no. 2, pp. 134-136.

6. Golitsyn A.A. Glazom teplovizora [With the Eye of a thermal imager]. *Nauka iz pervykh ruk = Science at First Hand*, 2014, no. 3/4, pp. 198-203.

7. Chang J.R., Yang S.R. Innovation and Sustainable Technology in Road and Airfield Pavement. *Trans Tech Publications Ltd*, Germany, 2013, pp. 82-83.

8. Kavelin A.S., Tyutina A.D., Nuriev V.E., Kolotenko M.A. Ispol'zovanie teplovizionnogo metoda dlya osmotra zdaniy i poseshcheniya: obzor [The use of thermal imaging method for inspection of buildings and visits. Review]. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*, 2019, no. 6, pp. 17-23.

9. Tetior A.N. *Arkhitekturno-stroitel'naya ekologiya: [Architectural and construction ecology]*. Moscow, Academy Publ., 2008. 360 p.
10. Ivanchenko V.T., Basov E.V., Trishkina A.A. *Sozdanie optimal'noi temperaturno-vlazhnostnoi mikrosredy v zhilykh zdaniyakh [Creation of an optimal temperature and humidity microenvironment in residential buildings]*. *Zhilishchnoe stroitel'stvo = Housing Construction*, 2015, no.8, pp. 24-28.
11. Enyushin V.N., Kamaltdinova E.M. *Termograficheskoe obsledovanie karkasnogo doma [Thermographic examination of a frame house]*. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = Izvestiya Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*, 2011, no.2(16), pp. 86-93.
12. Lukyanov V.I. *Nestatsionarnyi massoperenos v stroitel'nykh materialakh i konstruktsiyakh pri reshenii problem povysheniya zashchitnykh kachestv ograzhdayushchikh konstruktsii zdaniy s vlazhnym i mokry rezhimom. Abstract. dis. dokt. techn. nauk [Unsteady mass transfer in building materials and structures in solving problems of increasing the protective qualities of enclosing structures of buildings with wet and wet conditions. Dr. Eng. sci. abstract diss.]*. Moscow, 1993, 24 p.
13. Makeev M.F., Melnikov D E., Marchenko M.I. *Energeticheskaya effektivnost' ob'emno-planirovochnykh reshenii mnogokvartirnykh zhilykh domov v raznykh klimaticheskikh usloviyakh [Energy efficiency of space-planning solutions of apartment buildings in different climatic conditions]*. *Nauchnyi zhurnal. Inzhenernye sistemy i sooruzheniya = Scientific journal. Engineering systems and structures*, 2018, no.3(32), pp. 49-54.
14. LLC "PENOPLEX SPb" *Thermal pads PENOPLEX® – an innovative product for use in monolithic housing construction. Nauchno-tekhnicheskii i proizvodstvennyi zhurnal = Scientific, Technical and Production Journal*. 2017, no. 8, pp. 12-13.
15. Rudenko N.N., Fursova I.N. *Vliyanie nestatsionarnykh teplovykh uslovii na opredelenie termicheskogo soprotivleniya ograzhdeniya [Influence of non-stationary thermal conditions on the determination of thermal resistance of the fence]*. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*, 2013, no.4(27), 225 p.
16. Kologermanskaya E.M. *Pravovoe regulirovanie ispol'zovaniya vozobnovlyаемых istochnikov energii v rossiiskoi federatsii i zarubezhnykh gosudarstvakh. Diss. cand. jurid. nauk [Legal regulation of the use of renewable energy sources in the Russian Federation and foreign countries. Cand. jurid. sci. diss.]*. Moscow, 2020, 369 p.
17. Semenov V.S., Rozovskaya T.A. *Povyshenie energoeffektivnosti ograzhdayushchikh konstruktsii s primeneniem oblegchennykh kladochnykh rastvorov [Improving the energy efficiency of enclosing structures with the use of lightweight masonry mortars]*. *Stroitel'nye materialy = Building Materials*, 2015, no.6, pp. 16-19.

18. Blanco F., Garcia P., Mateos P., Ayala J. Characteristics and properties of light-weight concrete manufactured with cenospheres. *Cement and Concrete Research*, 2012, no. 30, pp. 1715-1722.

19. Samarin O.D., Tishchenkova I.I. Issledovanie reguliruemyykh parametrov v avtomatizirovannykh klimaticheskikh sistemakh v tselyakh energosberezheniya [Investigation of regulated parameters in automated climate systems for energy saving purposes]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal* = *Engineering and Construction Magazine*, 2013, no. 2(37), pp. 13-18.

Информация об авторах / Information about the Authors

Сотникова Ольга Анатольевна, доктор технических наук, профессор кафедры проектирования зданий и сооружений, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: ksenija.sotnikova@yandex.ru

Olga A. Sotnikova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Design of Buildings and Structures Department, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: ksenija.sotnikova@yandex.ru

Целярицкая Маргарита Ивановна, старший преподаватель кафедры проектирования зданий и сооружений, Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: marirry@yandex.ru

Margarita I. Tselyaritskaya, Senior Lecturer of the Design of Buildings and Structures Department, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: marirry@yandex.ru

Пашченко Юлия Олеговна, ассистент кафедры проектирования зданий и сооружений, Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: pz-vgasu@mail.ru

Yulia O. Pashchenko, Assistant of the Design of Buildings and Structures Department, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: pz-vgasu@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-35-46>

Замковый механизм для соединения элементов съёмной опалубки

А. Н. Гречухин¹ ✉, В. В. Куц¹, Д.А. Павлов¹

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

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Для соединения элементов вертикальных опалубочных конструкций, состоящих из металлических каркасов и закрепленных на них щитов, широкое применение получили замковые механизмы. Целью исследования является разработка конструкции замкового механизма для элементов съёмной опалубки, обладающего высокими технологическими характеристиками. Проведен патентный поиск существующих конструкторских решений для обеспечения соединения элементов съёмной опалубки. Выявлено, что наиболее распространёнными конструкциями, применяемыми в замковых механизмах элементов съёмной опалубки, являются реечные конструкции. Проведен анализ существующих конструкций, выявлены недостатки существующих устройств. Установлено, что существующие конструкции замковых механизмов для соединения элементов съёмной опалубки обладают низкой технологичностью изготовления отдельных элементов. В связи с этим, для решения задачи исследования была разработана конструкция замкового механизма, обеспечивающего соединение элементов съёмной опалубки. Отличительной особенностью применения новой конструкции замкового механизма для соединения элементов съёмной опалубки является применение новой конструкции зубчатой рейки, которая является более технологичной в изготовлении, по сравнению с существующими конструкциями. Другой отличительной особенностью является применение клина с гладкими гранями, что так же повышает технологичность изготовления конструкции устройства для соединения элементов съёмной опалубки. Для достижения обозначенной цели был применён аналитический метод исследований. Применение предлагаемой конструкции позволит повысить технологичность изготовления замковых механизмов для соединения элементов съёмной опалубки. Предлагаемая конструкция замкового механизма для соединения элементов съёмной опалубки, разработанная в результате проведенного исследования, имеет конструктивные особенности, связанные с условиями эксплуатации. Данные особенности будут рассмотрены в результате проведения дальнейших исследований.

Методы. Для проведения экспериментов был применён аналитический метод исследования.

Результаты. Определён диапазон размеров основных конструктивных элементов замкового механизма для соединения элементов съёмной опалубки, обеспечивающий эксплуатацию устройства при действии проектных нагрузок.

Заключение. Результаты исследования показали, что существующие конструкции замковых механизмов для соединения элементов съёмной опалубки обладают недостатками, одним из которых является низкая технологичность изготовления устройств. Разработана конструкция замкового механизма, обеспечивающая более высокую технологичность изготовления. Предлагаемое устройство может быть применено в строительстве для соединения элементов съёмной опалубки.

Ключевые слова: замковый механизм; замок; опалубка; строительство; конструкция.

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

Для цитирования: Гречухин А. Н., Куц В. В., Павлов Д.А. Замковый механизм для соединения элементов съемной опалубки // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(3): 35-46. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-35-46>.

Поступила в редакцию 02.06.2022

Подписана в печать 10.08.2022

Опубликована 30.09.2022

Locking Mechanism for Connecting Elements of Non-Removable Formwork

Alexander N. Grechukhin ¹ ✉, Vadim V. Kuts ¹, Dmitry A. Pavlov ¹

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

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Locking mechanisms have been widely used to connect elements of vertical formwork structures consisting of metal frames and shields fixed to them. The purpose of the study is to develop the design of the locking mechanism for the elements of removable formwork, which has high technological characteristics. A patent search was conducted for existing design solutions to ensure the connection of elements of removable formwork. It has been revealed that the most common structures used in the locking mechanisms of removable formwork elements are rack-and-pinion structures. The analysis of existing structures is carried out, the shortcomings of existing devices are revealed. It is established that the existing designs of locking mechanisms for connecting elements of removable formwork have low manufacturability of individual elements. In this regard, in order to solve the research problem, the design of the locking mechanism was developed, which ensures the connection of the elements of the removable formwork. A distinctive feature of the application of the new design of the locking mechanism for connecting the elements of removable formwork is the use of a new design of the toothed rail, which is more technologically advanced in manufacturing, compared with existing designs. Another distinctive feature is the use of a wedge with smooth edges, which also increases the manufacturability of the construction of the device for connecting the elements of removable formwork. To achieve this goal, an analytical research method was applied. The use of the proposed design will increase the manufacturability of the manufacture of locking mechanisms for connecting elements of removable formwork. The proposed design of the locking mechanism for connecting the elements of removable formwork, developed as a result of the study, has design features related to operating conditions. These features will be considered as a result of further research.

Methods. Simulation modeling methods were used to conduct the experiments.

Results. The range of sizes of the main structural elements of the locking mechanism for connecting the elements of removable formwork, ensuring the operation of the device under the action of design loads, is determined.

Conclusion. The results of the study showed that the existing designs of locking mechanisms for connecting elements of removable formwork have disadvantages, one of which is the low manufacturability of the devices. The design of the locking mechanism has been developed, which provides higher manufacturability. The proposed device can be used in construction to connect elements of fixed formwork.

Keywords: locking mechanism; lock; formwork; construction; construction.

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

For citation. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Pavlov D.A. | Locking mechanism for connecting elements of non-removable formwork. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(3): 35-46 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-35-46>.

Received 02.06.2022

Accepted 10.08.2022

Published 30.09.2022

Введение

В монолитно-бетонном строительстве широкое применение получила съемная сборно-щитовая опалубка. Основная задача такой опалубки заключается в придании строительной конструкции прочности и заданной проектной формы. Вне зависимости от того, из какого материала будет формироваться съемная опалубка, она должна соответствовать следующим требованиям [1-6]:

- каркас опалубочной конструкции должен обеспечивать прочность в процессе воздействия эксплуатационных нагрузок;
- форма опалубочной конструкции должна быть зафиксированной;
- детали опалубочной конструкции должны быть соединены друг с другом с минимальными зазорами;
- опалубочная конструкция должна легко монтироваться;
- опалубочная конструкция должна быть герметичной.

Для соединения элементов вертикальных опалубочных конструкций, состоящих из металлических каркасов и закрепленных на них щитов, широкое применение получили замковые механизмы, благодаря которым стало воз-

можно осуществить сборку форм с точно заданными параметрами (рис. 1,2).

Существует достаточно широкий ряд устройств – замковых механизмов для соединения элементов съемной опалубки [1-10].

Широкое применение получили клиновые замковые механизмы [1,2,4] сочетающие в себе простоту конструкции, простоту монтажа, высокие эксплуатационные свойства.

Известно устройство, включающее рейку, неподвижные прижимные губки, подвижные прижимные губки и прижимной клин, рейку, состоящую из основной и зубчатой частей, неподвижные прижимные губки, подвижные прижимные губки с хвостовой частью, снабженной выступами, выполненными с обеспечением их упирания в ограничители при достижении крайних её положений, в хвостовой части выполнено отверстие, в котором расположен прижимной клин, снабжённый ответными зубьями, и выполнен с обеспечением возможности перемещения поперёк рейки и вдоль отверстия до упирания первого упора или второго упора в хвостовую часть при достижении крайних его положений [4].



Рис. 1. Пример применения съемной опалубки при возведении монолитно-бетонной вертикальной стены

Fig. 1. An example of the use of removable formwork in the construction of a monolithic-concrete vertical wall

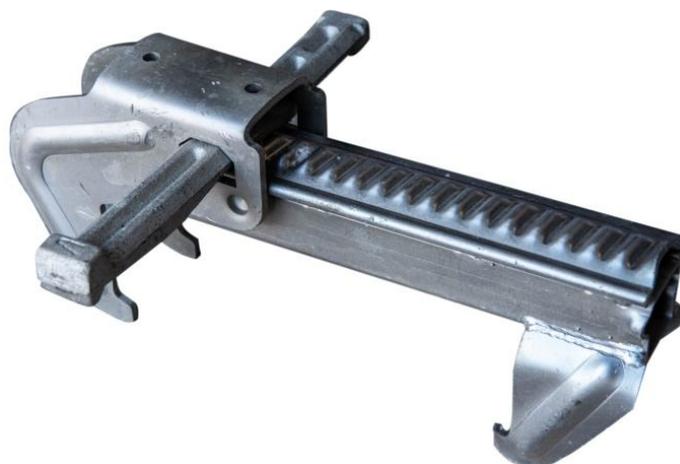


Рис. 2. Реечный замок для съемной опалубки

Fig. 2. Rack and pinion lock for removable formwork

Замки такой конструкции обладают высокими эксплуатационными характеристиками, позволяют выполнить монтаж опалубочных систем широкого ряда производителей [10-14].

Одним из недостатков существующей конструкции является низкая технологичность изготовления зубчатой рейки, технологический процесс изготовления которой включает отрезную, а

так же нескольких операций по высадке и гибке профиля, что усложняет технологию изготовления предлагаемого устройства в целом [13-18].

Материалы и методы

Целью данного исследования является разработка конструкции замкового механизма реечного типа для соединения элементов съемной опалубки, обладающего помимо высоких эксплуатационных характеристик более высокой технологичностью, за счет применения другой конструкции зубчатой рейки.

Существует устройство для соединения элементов съемной опалубки, содержащее – неподвижный держатель, размещенный на верхней поверхности и на конце замкового профиля, зубчатый элемент, размещенный на нижней поверхности замкового профиля так, что зубчатые края совпадают с боковыми поверхностями замкового профиля, подвижный держатель, соединенный с боковыми поверхностями зубчатого элемента так, чтобы находиться между зубчатым элементом и замковым профилем, фиксатор, который присоединен к подвижному держателю на нижней поверхности зубчатого элемента, фиксирует подвижный держатель на зубчатом элементе путем закрытия фиксатора в направлении нижней поверхности зубчатого элемента так, что выступ на подвижном держателе совпадает с пазами на боковых поверхностях зубчатого элемента и обеспечивает фиксацию/зацепление профилей так, что вы-

ступающие части на концах подвижного держателя и неподвижного держателя совпадают с углублениями в профилях [4].

Недостатком известного технического решения является низкая технологичность изготовления устройства в целом, которая обуславливается необходимостью встраивания в общую конструкцию технического решения механизма фиксации, включающего в себя дополнительные элементы, необходимые для размещения, крепления и перемещения данного механизма в составе известного технического решения, что в определенной степени так же повышает сложность изготовления устройства.

Цель исследования достигается за счет того, что в замке для щитов опалубки, содержащем рейку, неподвижные прижимные губки, подвижные прижимные губки и прижимной клин, причём рейка состоит из основной части, которая на своих концах снабжена ограничителями, и зубчатой части, которая снабжена вдоль длины рейки зубьями, причём зубчатая часть расположена на основной части таким образом, что зубья совмещаются с боковыми поверхностями основной части рейки, неподвижные прижимные губки закреплены на рейке неподвижно, а подвижные прижимные губки снабжены хвостовой частью, которая охватывает рейку с обеспечением возможности перемещения подвижных прижимных губок вдоль рейки, при этом хвостовая часть снабжена выступами, которые входят в зацепление с

зубьями, совмещенными с боковыми поверхностями основной части рейки, и выполнены с обеспечением их упирания в ограничители при достижении крайних её положений при движении хвостовой части по рейке, в хвостовой части выполнено отверстие, в котором расположен прижимной клин, выполненный с обеспечением возможности перемещения поперёк рейки и вдоль отверстия до упирания первого упора или второго упора в хвостовую часть при достижении крайних его положений, прижимной клин взаимодействует с хвостовой частью через отверстие, а так же с зубчатой рейкой.

Техническая сущность и принцип действия устройства поясняются рис. 3.

Замок для щитов опалубки содержит рейку 1, неподвижные прижимные губки 12, подвижные прижимные губки 7 и прижимной клин 10, рейка состоит из основной части 2, которая на своих концах снабжена ограничителями 6, и зубчатой части 3, которая снабжена вдоль длины рейки зубьями 4, зубчатая часть 4 расположена на основной части 2 таким образом, что зубья 4 совмещаются с боковыми поверхностями основной части рейки 2, неподвижные прижимные губки 12 закреплены на рейке неподвижно, подвижные прижимные губки 7 снабжены хвостовой частью 8, которая охватывает рейку 1, обеспечивая таким образом возможность перемещения подвижных прижимных губок 7 вдоль рейки 1, при этом хвостовая

часть 8 снабжена выступами 15, которые входят в зацепление с зубчатой частью 3, зубья 4 которой совмещены с боковыми поверхностями основной части 2 рейки 1, и выполнены с обеспечением их упирания в ограничители 6 при достижении крайних её положений при движении хвостовой части 8 по рейке 1, в хвостовой части 8 выполнено отверстие 9, в котором расположен прижимной клин 10, выполненный с обеспечением возможности перемещения поперёк рейки 1 и вдоль отверстия 9 до упирания упора 14 или упора 20 в хвостовую часть 8 при достижении крайних его положений, прижимной клин 10 взаимодействует с хвостовой частью 8 через отверстие, а так же зубчатой рейкой 3 и ее зубьями 4.

Прижимной клин 10 в сечении представляет собой элемент многоугольного либо окружного профиля.

Зубчатая часть рейки 3 представляет собой часть металлического листа с отогнутыми на угол 90 градусов краями, на которых выполнены зубья 4. Геометрические размеры зубчатой части рейки 3 определяются размерами основной части рейки 2, таким образом, обеспечивается базирование зубчатой части рейки 3 на основной части рейки 2. Предлагаемая конструкция зубчатой части рейки, по сравнению с аналогом, является более технологичной в изготовлении, поскольку изготовить такую конструкцию возможно более экономичными технологиями [18-20].

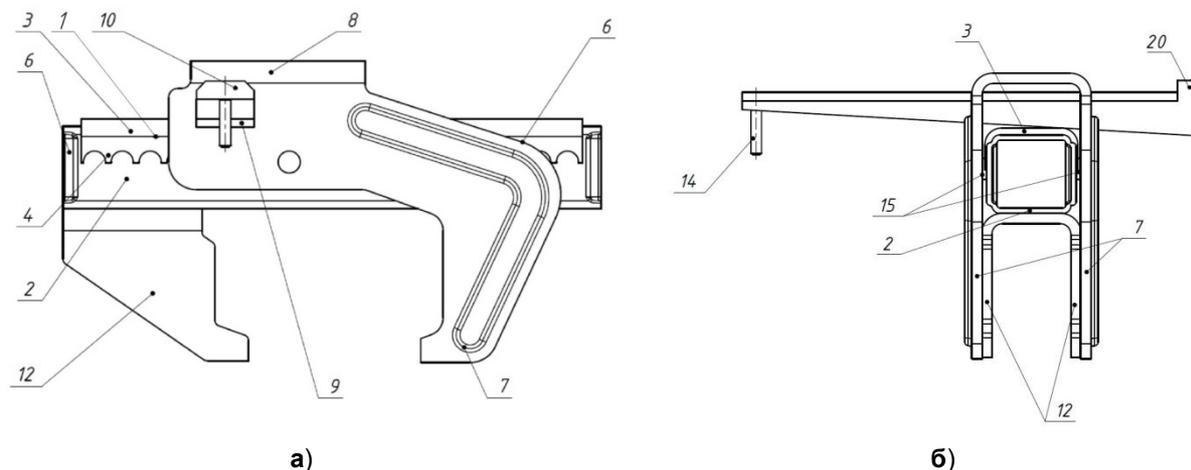


Рис. 3. Замковый механизм для соединения элементов съемной опалубки: **а** – Вид спереди устройства: **1** – рейка, **2** – основная часть рейки, **3** – зубчатая часть рейки, **4** – зубья, **6** – ограничитель, **7** – подвижные прижимные губки, **8** – хвостовая часть, **9** – отверстие, **10** – клин, **12** – неподвижные прижимные губки; **б** – Вид сбоку устройства: **2** – основная часть рейки, **3** – зубчатая часть рейки, **7** – подвижные прижимные губки, **12** – неподвижные прижимные губки, **14** – штифт, **15** – выступы, **20** – клин

Fig. 3. Locking mechanism for connecting elements of non-removable formwork: **a** – Front view of the device: **1** – rail, **2** – main part of the rail, **3** – toothed part of the rail, **4** – teeth, **6** – limiter, **7** – movable clamping jaws, **8** – tail part, **9** – hole, **10** – wedge, **12** – fixed clamping jaws; **б** – Side view of the device: **2** – the main part of the rail, **3** – the toothed part of the rail, **7** – movable clamping jaws, **12** – fixed clamping jaws, **14** – pin, **15** – projections, **20** – wedge

Устройство работает следующим образом: устройство устанавливают на соединяемых щитах опалубки, при этом прижимной клин **9** выводят из контакта с рейкой **1** путем его перемещения в направлении, совпадающем с направлением оси отверстия **9** до контакта ограничителя **14** с хвостовой частью **8**. Неподвижные прижимные губки **12** устанавливают в пазы одного из соединяемых щитов, устройство смыкают, перемещая подвижные прижимные губки **7** вдоль зубчатой части рейки **3** таким образом, чтобы подвижные прижимные губки **7** и неподвижные прижимные губки **12** попали в пазы соединяемых щитов опалубки. Затем, путем перемещения подвижных прижимных губок **7**

в направлении, перпендикулярном нижней части рейки **1**, в сторону зубчатой части рейки **3**, вводят в зацепление речные зубья **4** и выступы **15** хвостовой части **8**, прижимной клин **10** вводят в контакт с отверстием **9** хвостовой части **8** и обратной частью зубчатой части рейки **3** путем перемещения клина **10** в направлении, совпадающем с осью отверстия **9**, в сторону сближения упора **20** с хвостовой частью **8**. Запирание устройства производится ударами молотка по прижимному клину **10** со стороны упора **20**. Размыкание устройства происходит в обратной последовательности путем приложения силы удара молотка по клину **10** со стороны упора **14**.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенных исследований выявлены конструкции замковых механизмов, предназначенных для соединения элементов съемной опалубки. Выявлено, что существующие конструкции замковых механизмов обладают недостатками, одним из которых является низкая технологичность изготовления некоторых составляющих элементов. Для решения задачи повышения технологичности изготовления замковых механизмов съемной опалубки разработано устройство, отличающееся от существующих механизмов конструкцией зубчатой рейки, представляющей металлический лист с отогнутыми на угол 90 градусов краями, на которых выполнены зубья, за счет чего, заявленное устройство для соединения щитов

опалубки является более технологичным в изготовлении.

Выводы

Конструкция замкового механизма для соединения элементов съемной опалубки, разработанная в результате проведенного исследования, имеет некоторые конструктивные особенности. В частности, применение пары выступ рейка, обеспечивающей фиксацию хвостовой части устройства относительно неподвижных прижимных губок, требует проведения проверочного расчета на прочность выступов хвостовой части, в результате которого должны быть установлены предельные значения геометрических параметров пары, обеспечивающих безотказную эксплуатацию устройства под действием эксплуатационных нагрузок.

Список литературы

1. Патент 2769026 Рос. Федерация: МПК5 F16B 2/12. Замковый механизм для систем щитовой опалубки: заявл. 30.01.2019; опубл. 28.03.2022 Бюл. № 10 / Дал, Джевдет; заявитель, патентообладатель УРТИМ КАЛИП ВЕ ИСКЕЛЕ, СИСТЕМЛЕРИ САНАИ ВЕ ТИЧАРЕТАНОНИМ СИРКЕТИ.

2. Патент 184025 Рос. Федерация: МПК5 E04G 17/00. Замок для соединения щитов опалубки: заявл. 10.04.2018; опубл. 12.10.2018 Бюл. № 29 / Бунт М.Я., Леонова М.Я., Гурин Е.Г. [и др.]; заявитель патентообладатель Бунт М.Я., Леонова М.Я., Гурин Е.Г. [и др.].

3. Патент 95009 Рос. Федерация: МПК5 E04G 17/07. Замок для соединения элементов опалубки: заявл. 05.02.2010; опубл. 10.06.2010 Бюл. № 16 / Луценко С.Ф.; заявитель, патентообладатель Луценко С.Ф.

4. Патент 52897 Рос. Федерация: МПК5 E04G 17/00. Замок для соединения щитов опалубки: заявл. 28.07.2005; опубл. 27.04.2006 Бюл. № 12 / Бунт М.Я., Леонова М.Я., Гурин Е.Г. [и др.]; заявитель патентообладатель Бунт М.Я., Леонова М.Я., Гурин Е.Г. [и др.].

5. Патент 52424 Рос. Федерация: МПК5 E04G 17/04. Замок опалубки: заявл. 10.10.2005; опубл. 27.03.2006 Бюл. № 9 / Большаков Ю.А., Кабаков А.П., Котов А.В. [и др.]; заявитель, патентообладатель Котов А.В.

6. Патент 2737744 Рос. Федерация : МПК5 E04G 17/04. Опалубка для железобетонных конструкций и сооружений: заявл. 15.06.2020; опубл. 02.12.2020, Бюл. №34 / Хегай О.Н., Хегай М.О., Хегай А.О. [и др.]; заявитель, патентообладатель ФГБОУ ВО ХГУ им. Н.Ф. Катанова.

7. Патент 71682 Рос. Федерация: МПК5 E04G 17/04. Несъемная опалубка для возведения монолитных стен с одновременной облицовкой фасада: заявл. 01.11.2007; опубл. 20.03.2008, Бюл. №8 / Антропов О.В; заявитель, патентообладатель Антропов О.В.

8. Патент 109433 Рос. Федерация: МПК5 E04G 17/04. Съемная опалубка для изготовления стеновых панелей из ячеистого бетона: заявл. 08.04.2021; опубл. 08.04.2011, Бюл. №29 / Шарифулин Р.И., Нещаденко Н.И., Красий Р.А.; заявитель, патентообладатель Шарифулин Р.И.

9. Патент 2415238 Рос. Федерация: МПК5 E04G 17/04. Комплект съемной опалубки с многослойной стеновой заготовкой; заявл. 21.12.2009; опубл. 27.03.2011, Бюл. №9 / Семенов Д.К.; заявитель, патентообладатель Семенов Д.К.

10. Патент 2248433 Рос. Федерация: МПК5 E04G 17/04. Несъемная опалубка, способ ее сборки и способ возведения монолитных стен и сооружений в несъемной опалубке; заявл. 19.12.2003; опубл. 20.03.2005, Бюл. №8 / Исламов А.Г., Иванов С.И., Семенча А.И., [и др.]; заявитель, патентообладатель ЗАО «Аркада».

11. Глаголев Е.С. 3d-аддитивные строительные технологии. Теория и практика // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2021. № 2. С. 8-14.

12. Туснин А.Р., Ахрамочкина Т.И. Сталежелезобетонные перекрытия с использованием гнутых стальных профилей // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 5. С. 10-14.

13. Севрюкова О.В. Современные разновидности съемной опалубки // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, 2017. С. 1225-1229.

14. Рябов М.А., Биленко В.А. Возведение домов с использованием несъемной опалубки из стекломгнезитовых листов // Новые технологии в учебном процессе и производстве: материалы XIX Международной научно-технической конференции. Рязань, 2021. С. 113-114.

15. Экономические преимущества при использовании несъемной опалубки в монолитном строительстве / Ю.Н. Москвина, А.В. Бровкин, К.В. Дворянкова, А.А. Чубарова // Теоретические исследования и экспериментальные разработки студентов и аспирантов: сборник научных трудов: в 2 ч. / под ред. Т.Б. Новиченковой. Тверь, 2020. С. 127-132.

16. Гайдуков П.В., Пугач Е.М. Перспективы применения несъемной опалубки для устройства перекрытий малоэтажных зданий в стесненных условиях // Вестник евразийской науки. 2020. Т. 12. № 1. С. 5.

17. Investigation of the process of additive formation of fusible materials using a low-power solid-state laser / V.V. Kuts, V.S. Merkulov, A.N. Grechukhin, A.S. Privalov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 16. Сер. "Dynamics of Technical Systems, DTS 2020" 2021. С. 012010.

18. Гречухин А.Н., Куц В.В., Щербаков П.С. Выявление влияния пространственной ориентации наплавливаемых слоев, а также коэффициента их перекрытия на погрешность формы поверхности при аддитивном формообразовании электрической дугой // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 6. С. 118-124.

19. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Solving problem of curved surface approximation by layers with constant and variable sections during forming by additive methods // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Conference proceedings. Series: Lecture Notes in Mechanical Engineering (LNME). Cham, 2020. С. 239-248.

20. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Oleshitsky A.V. Control additive error of morphogenesis with the use of hybrid layout // AIP Conference Proceedings. XV International Scientific-Technical Conference "Dynamics of Technical Systems", DTS 2019. 2019. С. 020003.

References

1. Dal Djevdet. *Zamkovyi mekhanizm dlya si-stem shchitovoi opalubki* [Locking mechanism for panel formwork systems]. Patent RF, no. 2769026 Grew, 2022.

2. Bunt M.Ya., Leonova M.Ya., Gurin E.G. e. a. *Zamok dlya soedineniya shchitov opalubki* [Lock for connecting the formwork panels]. Patent RF, no. 184025 Grew, 2018.

3. Lutsenko S.F. *Zamok dlya soedineniya elementov opalubki* [Lock for connecting the formwork elements]. Patent RF, no. 95009 Grew, 2010.

4. Bunt M.Ya., Leonova M.Ya., Gurin E.G. e. a. *Zamok dlya soedineniya shchitov opalubki* [Lock for connecting the formwork panels]. Patent RF, no. 52897 Grew, 2005.

5. Bolshakov Yu.A., Kabakov A.P., Kotov A.V. *Zamok opalubki* [Shuttering lock]. Patent RF, no. 52424 Grew, 2006.

6. Hegai O.N., Hegai M.O., Hegai A.O. e. a. *Opalubka dlya zhelezobetonnykh konstruksii i sooruzhenii* [Formwork for reinforced concrete structures and structures]. Patent RF, no. 2737744 Grew, 2020.

7. Antropov O.I. *Nes"emnaya opalubka dlya vozvedeniya monolitnykh sten s odnoremennoi oblitsovkoj fasada* [Fixed formwork for the construction of monolithic walls with simultaneous facade cladding]. Patent RF, no. 71682 Grew, 2007.

8. Sharifulin R.I., Neschadenko N.I., Krasiy R.A. *S"emnaya opalubka dlya izgotovleniya stenovykh panelei iz yacheistogo betona* [Removable formwork for the manufacture of cellular concrete wall panels]. Patent RF, no. 109433 Grew, 2021.

9. Semenov D.K. *Komplekt s"emnoi opalubki s mnogoslainoi stenovoi zagotovkoi* [A set of removable formwork with a multilayer wall blank]. Patent RF, no. 2415238 Grew, 2011.

10. Islamov A.G., Ivanov S.I., Semencha A.I. e. a. *Nes"emnaya opalubka, sposob ee sborki i sposob vozvedeniya monolitnykh sten i sooruzhenii v nes"emnoi opalubke* [Fixed formwork, the method of its assembly and the method of erecting monolithic walls and structures in fixed formwork]. Patent RF, no. 2248433, 2003.

11. Glagolev E.S. 3d-additivnye stroitel'nye tekhnologii. Teoriya i praktika [3d additive construction technologies. Theory and practice]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova = Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*, 2021, no. 2, pp. 8-14.

12. Tusnin A.R., Akhramochkina T.I. Stalezhelezobetonnye perekrytiya s ispol'zovaniem gnutykh stal'nykh profilei [Steel-reinforced concrete floors using bent steel profiles]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Construction*, 2020, no. 5, pp. 10-14.

13. Sevryukova O.V. Sovremennye raznovidnosti s"emnoi opalubki [Modern varieties of removable formwork]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchennykh BGTU im. V.G. Shukhova* [International Scientific and Technical Conference of young scientists of V.G. Shukhov BSTU]. Belgorod, 2017, pp. 1225-1229.

14. Ryabov M.A., Bilenko V.A. Vozvedenie domov s ispol'zovaniem nes"emnoi opalubki iz steklomagnezitovykh listov [Construction of houses using fixed formwork made of glass-magnesian sheets]. *Novye tekhnologii v uchebnom protsesse i proizvodstve. Materialy XIX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [New Technologies in The Educational Process and Production. Materials of the scientific and technical XIX International Conference]. Ryazan, 2021, pp. 113-114.

15. Moskvina Yu.N., Brovkin A.V., Dvoryankova K.V., Chubarova A.A. Ekonomicheskie preimushchestva pri ispol'zovanii nes"emnoi opalubki v monolitnom stroitel'stve [Economic advantages when using fixed formwork in monolithic construction]. *Teoreticheskie issledovaniya i eksperimental'nye razrabotki studentov i aspirantov. Sbornik nauchnykh trudov* [Theoretical research and experimental developments of students and postgraduates. Collection of scientific papers]. ed. by T.B. Novichenkova. Tver, 2020, pp. 127-132.

16. Gaidukov P.V., Pugach E.M. Perspektivy primeneniya nes"emnoi opalubki dlya ustroistva perekrytii maloetazhnykh zdaniy v stesnennykh usloviyakh [Prospects for the use of fixed formwork for the construction of floors of low-rise buildings in cramped conditions]. *Vestnik evraziiskoi nauki = Bulletin of Eurasian Science*, 2020, vol. 12, no. 1, p.5.

17. Kutz V.V., Merkulov V.S., Grechukhin A.N., Privalov A.S. Investigation of the process of additive formation of low-melting materials using a low-power solid-state laser. *IOP Conference series: Materials Science and Engineering*. 16. Ser. "Dynamics of technical systems, DTS 2020" 2021, 012010 p.

18. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Shcherbakov P.S. Vyyavlenie vliyaniya prostranstvennoi orientatsii naplavlyaemykh sloev, a takzhe koeffitsienta ikh perekrytiya na pogreshnost' formy poverkhnosti pri additivnom formoobrazovanii elektricheskoi dugoi [Identification of the influence of the spatial orientation of the deposited layers, as well as their overlap coefficient on the error of the surface shape during additive shaping by an electric arc]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2021, vol. 17, no. 6, pp. 118-124.

19. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Razumov M.S. Solving the problem of approximation of a curved surface by layers with constant and variable cross-sections during molding by additive methods. *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Conference materials. Series: Lecture Notes on Mechanical Engineering (LNME)*. Cham, 2020, pp. 239-248.

20. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Oleshitsky A.V. Control of additive error of morphogenesis using hybrid layout. *Proceedings of the AIP conference. XV International Scientific and Technical Conference "Dynamics of Technical Systems"*, DTS 2019. 2019. p. 020003.

Информация об авторах / Information about the Authors

Гречухин Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: agrechuhin@mail.ru

Alexander N. Grechukhin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Machine-Building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: agrechuhin@mail.ru

Куц Вадим Васильевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Vadim V. Kuts, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor Machine-Building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Павлов Дмитрий Анатольевич, студент, кафедра машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dpavlov2021@mail.ru

Dmitry A. Pavlov, Student of Machine-Building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dpavlov2021@mail.ru

Управление запасами в цепях поставок на основе линейной дискретной системы с квадратичным критерием качества

Е.П. Белоусова¹, И.Н. Булгакова¹ ✉

¹ Воронежский государственный университет
Университетская площадь, д. 1, г. Воронеж, 394018, Российская Федерация

✉ e-mail: Bulgakonalrina966@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Провести анализ теоретических исследований моделей и методов, используемых в теории управления запасами, и направлений их практической реализации. Представить проблему оптимального управления запасами, как задачу дискретного управления. Задачи подобного типа формулируются в случаях, когда возникает необходимость формирования стратегий управления материально-производственными запасами в цепях поставок, учитывающих их организацию на определенном промежутке времени. Предложить метод решения соответствующей задачи управления.

Методы. В качестве базовой модели рассматривается процесс управления запасами на складе, при котором должен выполняться определенный баланс между продукцией, отпускаемой со склада в производство, отпускаемой под реализацию, а также ее остатками, формирующими запасы следующего периода. Процесс управления запасами в цепях поставок в течение планового периода основан на процедуре поиска соответствующего управляющего воздействия для линейной дискретной управляемой системы с квадратичным показателем качества. Реализация управления использует принцип обратной связи. В качестве инструмента реализации управления выбрана система компьютерной алгебры Wolfram Mathematica.

Результаты. В рамках изучения способов нахождения оптимального управления было выделено два метода решения – метод поиска оптимального программного управления и метод определения оптимального управления по принципу обратной связи. В процессе верификации полученного решения рассмотрены несколько модельных примеров, отличающихся начальными условиями.

Заключение. Результаты тестирования предлагаемой дискретной модели показали, что метод обратной связи позволяет достаточно эффективно решать задачу управления запасами с различными начальными условиями, которая описывается системой разностных уравнений.

Ключевые слова: производственные запасы; распределение; дискретная модель; оптимальное управление; метод обратной связи; система разностных уравнений.

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

Для цитирования: Белоусова Е.П., Булгакова И.Н. Управление запасами в цепях поставок на основе линейной дискретной системы с квадратичным критерием качества // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(3): 47-62. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-47-62>.

Поступила в редакцию 29.06.2022

Подписана в печать 17.08.2022

Опубликована 30.09.2022

Inventory Management in Supply Chains Based on a Linear Discrete System with a Quadratic Quality Criterion

Elena P. Belousova¹, Irina N. Bulgakova¹ ✉

¹ Voronezh State University
1, University Square, Voronezh 394018, Russian Federation

✉ e-mail: Bulgakonairina966@gmail.com

Abstract

Purpose of research. To analyze theoretical studies of models and methods used in the theory of inventory management and directions of their practical implementation. To present the problem of optimal inventory management as a discrete control problem. Tasks of this type are formulated in cases where there is a need to form strategies of management of material and production inventories in supply chains, taking into account their organization at a certain time interval. To propose a method for solving the corresponding management problem.

Methods. As a basic model, we consider the process of inventory management in the warehouse, in which a certain balance between the products released from the warehouse into production, released for sale, as well as its residues, which form the inventory of the next period must be fulfilled. The process of inventory management in supply chains during the planning period is based on the procedure of finding the appropriate control action for a linear discrete controlled system with a quadratic quality index. Implementation of control uses the principle of feedback. The computer algebra system Wolfram Mathematica is chosen as a tool for implementing the control.

Results. Within the framework of studying the methods of finding the optimal control, two solution methods were singled out - the method of finding the optimal program control and the method of determining the optimal control according to the feedback principle. In the process of verification of the obtained solution, several model examples with different initial conditions were considered.

Conclusion. The results of testing the proposed discrete model showed that the feedback method makes it possible to quite efficiently solve the inventory management problem with different initial conditions, which is described by a system of difference equations.

Keywords: production inventories; distribution; discrete model; optimal control; feedback method; system of difference equations.

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

For citation: Belousova E. P., Bulgakova I. N. Inventory Management in Supply Chains Based on a Linear Discrete System with a Quadratic Quality Criterion. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(3): 47-62 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-47-62>.

Received 29.06.2022

Accepted 17.08.2022

Published 30.09.2022

Введение

Наличие необходимых запасов продукции является ключевым фактором стабильного функционирования организации, обеспечения потребностей клиента, а также выполнения планируемого оборота. Принятие оптимального уровня запасов товаров приходится на основе целого набора критериев, например, частоты поставок, их минимальные и максимальные объемы, условия оптимизации, режима передачи данных, уровня страховых, минимальных и максимальных размеров запасов, рисков потери продукции из-за истечения срока годности. Основой для решения проблемы оптимизации могут стать методы, используемые в теории управления запасами. Теоретические исследования в области менеджмента запасов условно можно разделить на два основных направления, а именно, исследования в сфере прикладной логистики [1-4], исследования в сфере теории управления запасами [5-9]. Как правило, в подобных исследованиях делается акцент в основном на детальный анализ закономерностей, присутствующих в производственных системах.

В статье рассматривается дискретная модель задачи оптимального управления запасами. Задача такого типа формулируется в случаях, когда существует необходимость создания запаса некоторых продуктов на заданном промежутке времени. В ходе решения определяется количество заказываемых продуктов и сроки реализации заказов.

Отвечая на вопрос о количестве товаров в заказе, будем рассматривать такой размер заказа, от которого будет зависеть количество ресурсов, необходимых для реализации каждого из последующих заказов. Прежде чем искать ответ на вопрос о сроках реализации, необходимо определить тип рассматриваемой системы. Если система имеет периодический тип контроля состояния запасов продуктов, тогда заказ будет формироваться в определенные (обычно равные) промежутки времени. Если же система имеет непрерывный тип контроля состояния запасов, тогда срок следующего заказа будет определяться состоянием запасов на текущий момент времени.

Стоит отметить, что задача усложняется тем фактом, что необходимо не просто ответить на заданные вопросы, но и найти такие решения, чтобы реализация заказов осуществлялась с минимальными затратами.

На первый взгляд ответить на поставленные вопросы не составляет большого труда. Однако понятие оптимальности управления запасами в конкретной системе подразумевает условие минимизации суммарных затрат на заказы, а, соответственно, и на ресурсы. Заметим, что универсальную процедуру управления запасами, учитывающую и обобщающую максимально возможное количество параметров, которые наблюдаются в реальной системе, на практике построить достаточно сложно.

Материалы и методы

Будем рассматривать задачу управления материально-производственными запасами продукции на складе, представленную дискретной моделью [10; 11], для которой определено:

n – количество типов выпускаемой продукции;

m – количество видов используемых ресурсов, необходимых для выпуска продукции;

N – количество периодов времени, в течение которых необходимо принимать управляющие решения;

$k = k_0$ – момент начала процесса.

Для решения задачи удобно ввести следующие обозначения. Пусть вектор

$$x(k) = \{x_1(k), \dots, x_n(k)\}, \quad (1)$$

$$k = k_0, k_0 + 1, \dots, N - 1$$

представляет собой остатки материально-производственных запасов, сформировавшихся на складе к концу k -го периода.

Вектор

$$u(k) = \{u_1(k), \dots, u_m(k)\}, \quad (2)$$

$$k = k_0, k_0 + 1, \dots, N - 1$$

представим как вектор объемов ресурсов, необходимых для производства единицы продукции, а вектор

$$w(k) = \{w_1(k), \dots, w_n(k)\}, \quad (3)$$

$$k = k_0, k_0 + 1, \dots, N - 1$$

как вектор, характеризующий объемы продукции, реализованной со склада в k -й период времени. В таких обозначениях процесс изменения количества то-

варов описывается следующей системой разностных уравнений:

$$x(k+1) = x(k) + Bu(k) - w(k), \quad (4)$$

$$k = k_0, k_0 + 1, \dots, N - 1,$$

в которой $B_{n \times m}$ – технологическая матрица.

Между количеством поставленных в момент времени k товаров со склада $w_i(k)$ и количеством имеющихся в наличии в момент времени k товаров $x_i(k)$ существует зависимость, определяемая правилом

$$w_i(k) = a_i(k)x_i(k), \quad 0 \leq a_i \leq 1. \quad (5)$$

В соотношениях (5) коэффициенты $a_i(k)$ указывают, какая часть продукции i -го вида будет реализована в следующем периоде.

В данном случае речь идет о технологическом переделе, т.е. части технологического процесса или комплекса производственных операций, по завершении которого получается законченный полуфабрикат. Данный полуфабрикат может быть продан на сторону или использован на следующем переделе собственного производства. Один из переделов (заключительный) заканчивается получением не полуфабриката, а готовой продукции. В результате на каждом последовательном переделе образуются остатки промежуточной продукции, которые можно считать материально-производственным запасом для последующего этапа.

Проведя некоторые преобразования, систему уравнений (4) можно переписать в виде:

$$x(k+1) = A(k)x(k) + Bu(k) - w(k), \quad (6)$$

$$k = k_0, k_0 + 1, \dots, N-1,$$

где

$$A_{n \times n}(k) = \begin{bmatrix} 1-a_1(k) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1-a_2(k) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1-a_n(k) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Заметим, кроме того, что по условию задачи известны начальное состояние системы $x(k_0) = x_0$ и конечное состояние $x(N) = x_1$. Эффективность работы системы за период времени N определяется квадратичным критерием качества:

$$I(u) = \sum_{k=k_0}^{N-1} u^T(k)u(k). \quad (8)$$

Величина $I(u)$ позволяет обобщить все затраты на производство за весь плановый период.

Методы, реализующие решение задач управления с предлагаемым критерием (8), достаточно подробно рассмотрены и обоснованы. Родственные задачи описаны, например, в работах [10, 12-15, 19]. В сформулированной задаче требуется найти оптимальное управляющее воздействие $u^0(k)$, позволяющее перевести систему из заданного начального состояния $x(k_0) = x_0$ в заданное конечное состояние $x(N) = x_1$. Кроме того, вычисляя управление на каждом промежуточном шаге, необходимо находить соответствующие ему состояния системы $x(k)$, $k = k_0, k_0 + 1, \dots, N-1$. Очевидно, что оптимальность

искомого управления $u^0(k)$ подразумевает, что величина качества $I(u^0)$ будет наименьшей. Другими словами, должно быть справедливо неравенство:

$$I(u^0) = \sum_{k=k_0}^{N-1} u^{0T}(k)u^0(k) \leq \sum_{k=k_0}^{N-1} u^T(k)u(k). \quad (9)$$

Для построения управляющего воздействия применяется метод обратной связи, изложенный в [12]. Приведем обоснование оптимальности такого управления.

Управляющее воздействие находится в виде функции $u(t)$, которая переводит систему из начального состояния $x(t_0) = x_0$ в конечное $x(t_N) = x_1$. Оба условия предполагаются заданными заранее. Такие задачи называются задачами программного управления. Этот термин подчеркивает, что движение $x(t)$ осуществляется по программе, определяемой выбранным заранее управлением $u(t)$. Тем не менее, существует достаточно ситуаций, когда управление по программе не эффективно, поскольку в реальных условиях работы системы оказывается неудовлетворительным. Основным недостатком программного управления состоит в том, что он не учитывает возможные дополнительные факторы, возникающие в ходе реализации процесса. Так, если в системе в некоторый момент времени $t = t_*$ возникнут непредвиден-

ные изменения $\Delta x(t_*)$ вектора $x(t)$, то заданное, неизменное при $t \geq t_*$ программное управление $u(t)$ поведет систему, начиная с момента $t = t_*$ в состоянии $x(t_N)$, отличное от заданного в условии задачи конечного состояния x_1 . В подобных ситуациях воздействие u должно формироваться с учетом возможной поступающей дополнительной информации. Этому требованию отвечает управление, построенное по принципу обратной связи. Суть этого принципа состоит в том, что в каждый момент времени t управление u определяется на основе информации о текущем состоянии системы. Таким образом, воздействие u будет иметь вид $u(t, x(t))$ и зависеть не только от времени t , как программное управление, но и от состояния системы $x(t)$ в текущий момент времени.

Рассмотрим следующую ситуацию. Пусть заданы момент времени $t = t_N$ и состояние $x(t_N) = x_1$, в которое необходимо привести систему (6) к моменту времени t_N управлением $u = u^0[t, x]$. Время начала процесса и исходное состояние системы заранее не заданы и могут оказаться произвольными в пределах $0 \leq t \leq t_N$. Функцию $u^0[t, x]$ необходимо выбрать так, чтобы при любых начальных условиях $t = t_0$, $x = x_0$ достигался минимум критерия качества (8), то есть, чтобы выполнялось неравенство (9).

Будем предполагать, что система вполне управляема на отрезке $t_0 \leq t \leq t_N$. Примем, что начальный момент времени $t = t_0$ и начальное состояние системы $X = X_0$ выбраны. Известно также, что функция $u(\tau)$, $t_0 \leq \tau \leq t_N$, разрешающая поставленную задачу, имеет вид:

$$u(\tau) = M_1(\tau, t_0, t_N)x_0 + M_2(\tau, t_0, t_N)x_1, \quad (10)$$

где M_1 и M_2 – некоторые матрицы. Эту функцию в дальнейшем удобно обозначать символом $u_{t_0, x_0}(\tau)$, а соответствующее ему программное движение – символом $x_{t_0, x_0}(t)$. В частности, при $\tau = t_0$ получим:

$$u_{t_0, x_0}(t_0) = M_1(t_0, t_0, t_N)x_0 + M_2(t_0, t_0, t_N)x_1. \quad (11)$$

Так как величины t_N и x_1 по условию заданы, то правую часть равенства (11) будем рассматривать как функцию от $t = t_0$ и $x = x_0$ [16]:

$$u_{t, x}(t) = P(t)x + q(t) = r[t, x]. \quad (12)$$

Именно эта функция r , посчитанная для всех возможных значений t и x , и дает решение поставленной задачи. Другими словами,

$$u^0[t, x] = r[t, x] = P(t)x + q(t). \quad (13)$$

Проверим справедливость приведенного выше утверждения. Во-первых, построенная функция u^0 непрерывна по своим аргументам и, таким образом, является возможным управлением. Во-вторых, остается лишь проверить, что

движение $x_{t_0, x_0}(t)$ при $t_0 \leq t \leq t_N$ есть решение $x[t]$ уравнения:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t) + Bu^0[t, x(t)] = \\ &= Ax(t) + B(px(t) + q), \end{aligned} \quad (14)$$

причем, $u[t] = u^0[t, x_{t_0, x_0}(t)] = u_{t_0, x_0}(t)$.

С этой целью воспользуемся одним важным обстоятельством. Пусть t_γ – какой-нибудь момент времени из интервала (t_0, t_N) , тогда отрезок $t_\gamma \leq t \leq t_N$ оптимального движения $x_{t_0, x_0}(t)$ является оптимальным движением $x_{t_\gamma, x_\gamma}(t)$ с новым начальным условием $x_\gamma = x_{t_0, x_0}(t_\gamma)$. Это утверждение представляет собой основу принципа оптимальности. Следовательно, можно записать равенство:

$$u_{t_0, x_0}(t_\gamma) = u_{t_\gamma, x_\gamma}(t_\gamma) = u[t_\gamma, x_\gamma]. \quad (15)$$

Теперь по определению функций $u_{t_0, x_0}(t)$, $x_{t_0, x_0}(t)$ и вследствие (15) получаем:

$$\begin{aligned} x_{t_0, x_0}(t_\gamma + 1) &= Ax_{t_0, x_0}(t_\gamma) + Bu_{t_0, x_0}(t_\gamma) = \\ &= Ax_{t_0, x_0}(t_\gamma) + Bu[t_\gamma, x_{t_0, x_0}(t_\gamma)], \end{aligned} \quad (16)$$

что в силу произвольности t_γ доказывает, что функция $x_{t_0, x_0}(t)$ удовлетворяет уравнению (14). Причем, действительно, $u_{t_0, x_0}(t) = u[t, x_{t_0, x_0}(t)]$.

Таким образом, установлено следующее правило: для того, чтобы решить поставленную задачу об оптимальном управлении $u^0[t, x]$ системой (6) по принципу обратной связи, достаточно найти оптимальное управление

$u_{t_0, x_0}(t)$ для соответствующей программной задачи при любых возможных t_0 и x_0 . Тогда

$$u^0[t, x] = u_{t, x}(t). \quad (17)$$

Это утверждение было доказано в условиях минимизации критерия качества (8) на движениях линейной системы [12]. В действительности оно сохраняет свою силу для достаточно широкого класса задач. Обратим внимание на важное условие, которое должно выполняться относительно системы (6) [12].

Условие 1. Для того, чтобы система (6) была управляемой, необходимо и достаточно, чтобы ранг матрицы $[B, AB, A^2B, \dots, A^{n-1}B]$ был равен n .

Для построения программного оптимального управления введем обозначения:

$$s(k_0, x_0) = x_1 - A^{N-k_0} x_0, \quad (18)$$

$$S(k) = A^{N-k-1} B, \quad (19)$$

$$H^{(k_0)} = [S(k_0), S(k_0+1), \dots, S(N-1)], \quad (20)$$

где матрица $H^{(k_0)}$ имеет размерность $n \times (m(N-k_0))$. Пусть значения x_0 , x_1 и момент времени k_0 такие, что выполняется следующее

Условие 2. Вектор $s(k_0, x_0)$ принадлежит подпространству, натянутому на линейно независимые столбцы матрицы $H^{(k_0)}$.

Это условие равносильно требованию полной управляемости системы (6). Тогда справедливо

Утверждение 1. Для того, чтобы управления $\{u(k_0), u(k_0+1), \dots, u(N-1)\}$ переводили систему (6) из состояния $x(k_0) = x_0$ в состояние $x(N) = x_1$, необходимо и достаточно, чтобы $u(k_0), u(k_0+1), \dots, u(N-1)$ удовлетворяли матричному уравнению

$$\sum_{k=k_0}^{N-1} S(k)u(k) = c(k_0, x_0). \quad (21)$$

Рассмотрим далее вектор из $m(N - k_0)$ компонент:

$$u^{(k_0)} = \begin{pmatrix} u(k_0) \\ u(k_0+1) \\ \vdots \\ u(N-1) \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Тогда равенство (21) может быть представлено в виде

$$H^{(k_0)}u^{(k_0)} = c(k_0, x_0). \quad (23)$$

Для решения уравнения (23) с условием (9) введем в рассмотрение псевдообратную матрицу $H^{+(k_0)}$ со следующим ее представлением [17]:

$$H^{+(k_0)} = H^{T(k_0)} [H^{(k_0)}H^{T(k_0)}]^+. \quad (24)$$

Для лаконичной записи, учитывая определение $H^{(k_0)}$, обозначим:

$$D(k_0) = H^{(k_0)}H^{T(k_0)} = \sum_{k=k_0}^{N-1} S(k)S^T(k), \quad (25)$$

где $D(k_0)$ – симметрическая, неотрицательно определенная матрица размерности $n \times n$, для которой, согласно [12]:

$$D^+(k) = \sum_{i=1}^r \lambda_i^{-1} v_i v_i^T, \quad (26)$$

где $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_r > 0$ – собственные значения матрицы $D(k_0)$, v_1, v_2, \dots, v_r – ортонормированные собственные векторы, отвечающие соответствующим собственным значениям. Тогда,

$$H^{+(k_0)} = H^{T(k_0)}D^+(k_0). \quad (27)$$

В обозначениях, принятых выше, решение [17] уравнения (27) задается формулой:

$$u^{0(k_0)} = H^{+(k_0)}c(k_0, x_0) \quad (28)$$

или

$$u^{0(k_0)} = H^{T(k_0)}D^+(k_0)c(k_0, x_0). \quad (29)$$

Выбрав k -ю компоненту вектора $u^{0(k_0)}$, получим оптимальное программное управление на k -м шаге, ($k_0 \leq k \leq N-1$):

$$u^0(k) = S^T(k)D^+(k_0)c(k_0, x_0), \quad (30)$$

$$k = k_0, k_0+1, \dots, N-1,$$

которое далее будем обозначать как

$$u^0(k) = u^0(k; k_0, x_0). \quad (31)$$

Отметим, что применительно к решению задач теории управления псевдообратные матрицы использовались, в частности, в [13]. Для решения задачи поиска оптимального управляющего воздействия методом обратной связи введем следующие обозначения:

$$c(k) = c(k, x(k)) = x_1 - A^{N-k}x(k), \quad (32)$$

$$D(k) = \sum_{i=k}^{N-1} S(i)S^T(i). \quad (33)$$

Будем рассматривать правую часть равенства (19) как функцию от $k_0 = k$, $x_0 = x(k)$. Тогда управление, построен-

ное по принципу обратной связи ([2]), будет иметь вид:

$$\begin{aligned} u^0[k, x(k)] &= u^0[k; k, x(k)] = \\ &= S^T(k)D^+(k)c(k), \quad (34) \\ k &= k_0, k_0 + 1, \dots, N-1, \end{aligned}$$

Приведем вспомогательную теорему.

Теорема. Пусть выполнено условие 2 и $u^0(k; k_0, x_0)$ - оптимальное программное управление, переводящее систему (6) из начального состояния в конечное. Тогда $u^0(k; k_0, x_0)$ и управление, построенное по принципу обратной связи $u^0[k; k, x(k)]$, на движении $x_0(k)$ совпадают, т.е.

$$\begin{aligned} u^0[k; k, x_0(k)] &= S^T(k)D^+(k)c(k) = \\ &= u^0[k; k, x_0] = S^T(k)D^+(k_0)c(k_0), \quad (35) \end{aligned}$$

при всех $k = k_0, k_0 + 1, \dots, N-1$.

Следовательно, $u^0(k, x(k))$ из (34) – это оптимальное управление, построенное методом обратной связи. Промежуточные состояния системы, будут зависеть от $u^0(k)$ и будут иметь вид:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A(k)x(k) + Bu(k), \\ k &= k_0, k_0 + 1, \dots, N-1. \end{aligned}$$

Если при построении стратегии управления запасами необходимо обеспечить целочисленность векторов $x(k)$, характеризующих объем материально-производственных запасов в момент времени k , то величины $u(k)$ и значение критерия качества, будут определены, возможно, с некоторой погрешностью. Такая погрешность, как показано

Рыжиковым Ю.И. [5, с. 176-178], не является существенной и не оказывает серьезного влияния на принятие управленческого решения.

Результаты и их обсуждение

В качестве иллюстрации предлагаемого подхода рассмотрим процесс формирования стратегии управления материально-производственными запасами на плановый период 5 месяцев ($N=5$, $k=1,2,3,4,5$ – порядковый номер месяца), $k_0=1$.

Производственная программа рассчитана на производство 3-х видов продукции ($n=3$) с использованием ресурсов 2-х типов ($m=2$).

Начальное состояние системы предполагает наличие готовой продукции каждого вида в объеме $x(k_0)$ (в условных единицах):

$$x(k_0) = x_0 = (100, 50, 150),$$

конечное состояние системы через 5 плановых месяцев предполагает выход на производство готовой продукции каждого вида в объеме $x(N)$ (в условных единицах):

$$x(N) = x_1 = (1000, 1800, 2000).$$

Специфика рассматриваемого производства заключается в том, что ежемесячно часть продукции реализуется, а часть используется на внутренние потребности предприятия. Подобная структура производства характерна, например, для перерабатывающих отраслей, когда, часть продукции как результат

переработки (полуфабрикат) востребована в смежной отрасли, а часть продолжает перерабатываться на следую-

щем этапе. Доли реализуемой в k -й период времени продукции $a_i(k)$, $i=1,2,3$, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Доли реализуемой в k -й период времени продукции

Table 1. Proportion of products sold in the k -th period of time

$a_i(k)$	$k=0$	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$
$a_1(k)$	0,5	0,65	0,8	0,85	0,9
$a_2(k)$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85
$a_3(k)$	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95

Технологическая матрица затрачиваемых ресурсов, показывающая, какое количество определенного вида продукции необходимо для последующего производства, имеет вид:

$$B = \begin{bmatrix} 0,1 & 0,05 \\ 0,04 & 0,1 \\ 0,3 & 0,1 \end{bmatrix}.$$

Требуется найти величины ресурсов $u(k)$, минимизирующие критерий качества (8), а также объемы материально-производственных запасов, которые необходимо сформировать на конец k -го периода $x(k)$, чтобы к концу планового периода выйти на ранее заявленные показатели.

Обобщим рассматриваемые утверждения (10)-(35) в виде алгоритма (рис.1).

В качестве инструмента реализации алгоритма выбрана система компьютерной алгебры Wolfram Mathematica [20]. Полученные результаты представлены на рис. 2.

Выводы

Дискретные управляемые системы возникают, если появляется необходимость управлять распределением ресурсов через определенные фиксированные промежутки времени. Примером подобной системы является производственная система с несколькими последовательных технологически законченными переделами. Основная проблема для данных систем – организация управленческого учета, где возникает необходимость введения попередельного метода учета затрат и калькулирования себестоимости. Для корректного расчета себестоимости необходим механизм, реализующий эффективный контроль за использованием сырья (материально-производственных запасов), движением полуфабрикатов и готовой продукции.

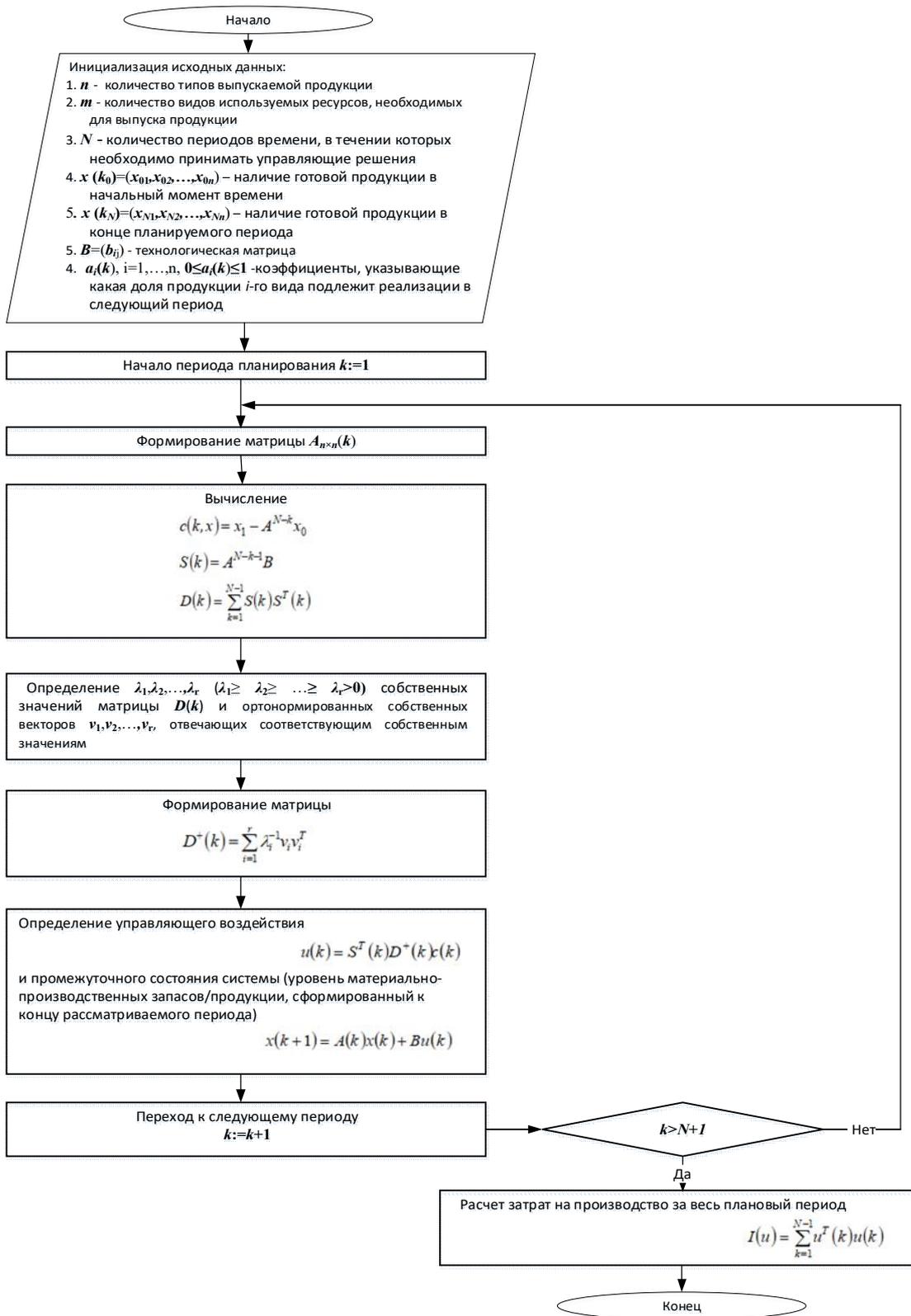


Рис. 1. Алгоритм формирования стратегии управления материально-производственными запасами методом обратной связи

Fig. 1. Algorithm of forming the strategy of management of inventories by feedback method

Количество видов продуктов $n=3$
 Количество видов ресурсов $m=2$
 Количество промежутков времени $N=5$
 Начальное состояние системы $x[k_0]=\{10, 50, 150\}$
 Конечное состояние системы $x[N]=\{1000, 1800, 2000\}$

Промежуточные значения $u[k]$ и $x[k]$:

$u[k_0] = \{389.679, 1148.14\}$
 $x[k_1] = \{101.375, 155.401, 291.717\} = \{101, 155, 292\}$

$u[k_1] = \{336.926, 1149.46\}$
 $x[k_2] = \{126.647, 190.583, 303.539\} = \{127, 191, 304\}$

$u[k_2] = \{403.54, 1590.51\}$
 $x[k_3] = \{145.209, 232.367, 340.821\} = \{145, 232, 341\}$

$u[k_3] = \{962.025, 3604.9\}$
 $x[k_4] = \{298.229, 445.444, 683.179\} = \{298, 445, 683\}$

$u[k_4] = \{907.386, 17023.3\}$
 $x[k_5] = \{971.724, 1805.44, 2008.7\} = \{972, 1805, 2009\}$

Критерий качества $I[u] = 3.10131 \times 10^8$

Рис. 2. Результаты программных вычислений

Fig. 2. The results of software calculations

В работе наглядно продемонстрированы результаты, которые показывают, что метод обратной связи позволяет эффективно решать задачу управления запасами, которая описывается системой разностных уравнений.

Использование подобного подхода в логистическом менеджменте создаст возможность для оперативного регулирования нормативов использования сырья и полуфабрикатов, что, в конечном итоге, значительно снизит технологические потери и материальные затраты.

Список литературы

1. Астраханцева А. С., Кириллова Т. К. Прикладные аспекты применения элементов логистики в управлении запасами // Региональные проблемы преобразования экономики. 2019. №1 (99). С. 97-102.
2. Кузнецов Н. В., Шишкова Е.Е. Совершенствование отдельных элементов системы управления запасами организации // Потребительская кооперация. 2019. № 1(65). С. 36-40.
3. Полуэктов В.А., Якутин Е.М. Сравнительный анализ методов управления запасами при неравномерном спросе // Организатор производства. 2021. № 1. С. 106-113.
4. Алешина А. В., Булгаков А. Л. О некоторых особенностях применения инструментов управления закупками и запасами товарно-материальных ценностей // Финансовые рынки и банки. 2022. №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-nekotoryh-osobennostyah-primeneniya-instrumentov-upravleniya-zakupkami-i-zapasami-tovarno-materialnyh-tsennostey>.
5. Рыжиков Ю.И. Логистика и теория очередей. М.: Изд-во «Лань», 2022. 456 с.
6. Капустин Е. В., Шкуркин А.С. Оптимизация параметров стохастической модели управления запасами // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. №46. С. 56-63.
7. Бажина Д. Б., Лукинский В. С., Николаевский Н. Н. Имитационное моделирование цепей поставок на основе системной динамики // Логистика и управление цепями поставок. 2020. № 1 (96). С. 47-56.
8. Никитина С. А., Ухоботов В. И. Дискретные динамические системы с помехой и их приложения к решению задачи управления запасами // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2021. № 2. С. 5-19.
9. Никитина С. А., Ухоботов В. И. Одномерная задача управления запасами при нечетком спросе // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2021. Т. 27, № 3. С. 152–162.
10. Сазанова Л. А. Дискретная модель управления запасами как задача оптимального управления // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление. 2017. № 3. С. 184-187.
11. Пропой А.И. Элементы теории оптимальных дискретных процессов. М.: Наука, 1973. 256 с.
12. Красовский Н. Н. Теория управления движением: Линейные системы. М.: Издательство «НАУКА»; Главная редакция физико-математической литературы, 1968. 475 с.

13. Альбрехт Э. Г., Сазанова Л. А. Синтез оптимального управления в линейных дискретных системах // Труды института математики и механики УрО РАН. 2000. Т. 6. № 1-2. С. 477-496.
14. Калман Р.Е. Об общей теории управления // Тр. I Междунар. Конгр. по автомат. упр. М.: Изд-во АН СССР, 1961. Т. 2. С. 56-62.
15. Надеждин П.В. О свойствах оптимальных и линейных импульсных систем // Изв. АН СССР, Техн. кибернетика. 1964. Вып. 4. С. 104-112.
16. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. М.: Наука, 1966. 576 с.
17. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов. М.: Наука, 1986. 232 с.
18. Воеводин В.В. Линейная алгебра. М.: Наука, 1980. 400 с.
19. La Salle J.P. The stability and control of discrete processes. N.Y.: Springer-Verlag, 1986. 150 p. (Applied Mathematical Sciences; Vol. 62).
20. Wolfram Mathematica. URL: <https://www.wolfram.com/mathematica/?source=nav> (дата обращения: 19.06.2022)

References

1. Astraxanceva A. S., Kirillova T. K. Prikladnye aspekty primeneniya elementov logistiki v upravlenii zapasami [Applied aspects of the application of elements of logistics in inventory management]. *Regional'nye problemy preobrazovaniya ekonomiki = Regional Problems of Economic Transformation*, 2019, no 1(99), pp. 97-102.
2. Kuznecov N. V., Shishkova E.E. Sovershenstvovanie otдел'nykh elementov sistemy upravleniya zapasami organizatsii [Improvement of individual elements of the organization's inventory management system]. *Potrebitel'skaya kooperatsiya = Consumer Cooperation*, 2019, no 1(65), pp. 36-40.
3. Polue`tkov V.A., Yakutin E.M. Sravnitel'nyi analiz metodov upravleniya zapasami pri neravnomernom sprose [Comparative analysis of inventory management methods for uneven demand]. *Organizator proizvodstva= Production Organizer*, 2021, no. 1, pp. 106-113.
4. Aleshina A. V., Bulgakov A. L. O nekotorykh osobennostyakh primeneniya instrumentov upravleniya zakupkami i zapasami tovarno-material'nykh tsennostei [On some specifics of the application of procurement and inventory management tools]. *Finansovye rynki i banki = Financial Markets and Banks*, 2022, no. 7. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-nekotoryh-osobennostyah-primeneniya-instrumentov-upravleniya-zakupkami-i-zapasami-tovarno-materialnyh-tsennostey>
5. Ry`zhikov Yu.I. *Logistika i teoriya ocheredej* [Logistics and queuing theory]. Moscow, Lan Publ., 2022. 456 p.

6. Kapustin E. V., Shkurkin A.S. Optimizatsiya parametrov stokhasticheskoi modeli upravleniya zapasami [Optimization of stochastic inventory management model parameters]. *Vestn. Tom. gos. un-ta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Bulletin of Tomsk State University. Management, Computer Science and Informatics*, 2019, no. 46, pp. 56-63.

7. Bazhina D. B., Lukinskij V. S., Nikolaevskij N. N. Imitacionnoe modelirovanie cepej postavok na osnove sistemnoj dinamiki [Supply chain simulation based on system dynamics]. *Logistika i upravlenie cepyami postavok = Logistics and Supply Chain Management*, 2020, no. 1(96), pp. 47-56.

8. Nikitina S. A., Uxobotov V. I. Diskretnye dinamicheskie sistemy s pomekhoi i ikh prilozheniya k resheniyu zadachi upravleniya zapasami [Discrete Dynamic Systems with Interference and their Applications to the Problem of Inventory Management]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika = Bulletin of South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Computer Science*, 2021, no. 2, pp. 5-19.

9. Nikitina S. A., Uxobotov V. I. Odnomernaya zadacha upravleniya zapasami pri nechetkom sprose [One-dimensional inventory management problem with fuzzy demand]. *Trudy Instituta matematiki i mekhaniki UrO RAN = Proceedings of the Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences*, 2021, vol. 27, no 3, pp.152–162.

10. Sazanova L. A. Diskretnaya model' upravleniya zapasami kak zadacha optimal'nogo upravleniya [Discrete model of inventory management as an optimal management problem]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika i upravlenie = Vestnik Voronezh State University. Series: Economics and Management*, 2017, no. 3, pp. 184-187.

11. Propoj A.I. *Elementy teorii optimal'nykh diskretnykh protsessov* [Elements of Optimal Discrete Process Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 256 p.

12. Krasovskij N. N. *Teoriya upravleniya dvizheniem: Lineinye sistemy* [Theory of Motion Control: Linear Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 475 p.

13. Albrext E. G., Sazanova L. A. Sintez optimal'nogo upravleniya v lineinykh diskretnykh sistemakh [Synthesis of Optimal Control in Linear Discrete Systems]. *Trudy instituta matematiki i mekhaniki UrO RAN = Proceedings of the Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences*, 2000, vol. 6, no. 1-2, pp. 477-296.

14. Kalman P.E. Ob obshhej teorii upravleniya [On the General Theory of Control]. *Proceedings of the I International Congress on Automatic Control*. Moscow, 1961, vol. 2, pp. 56-62.

15. Nadezhdin P.V. O svoistvakh optimal'nykh i lineinykh impul'snykh sistem [On the Properties of Optimal and Linear Pulse Systems]. *Izv. AN SSSR = Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, Technical Cybernetics*, 1964, vol. 4, pp. 104-112.

16. Gantmaxer F. R. *Teoriya matrits* [Matrix theory]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 576 p.
17. Louson Ch., Xenson P. *Chislennoe reshenie zadach metoda naimen'shikh kvadratov* [Numerical solution of least squares method problems]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 232 p.
18. Voevodin V.V. *Lineinaya algebra* [Linear Algebra]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 400 p.
19. La Salle J.P. The stability and control of discrete processes. N.Y.: Springer-Verlag, 1986. 150 p. (Applied Mathematical Sciences; Vol. 62).
20. Wolfram Mathematica. Available at: <https://www.wolfram.com/mathematica/?source=nav> (data obrashheniya: 19.06.2022)

Информация об авторах / Information about the Authors

Белюсова Елена Петровна, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра системного анализа и управления, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: e.p.belousova@gmail.com

Elena P. Belousova, Cand. of Sci. (Physical and Mathematical), Associate Professor, System Analysis and Management Department, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: e.p.belousova@gmail.com

Булгакова Ирина Николаевна, доктор экономических наук, доцент, кафедра системного анализа и управления, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: BulgakonaIrina966@gmail.com
SPIN-код: 5323- 8720,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-17795877>

Irina N. Bulgakova, Dr. of Sci. (Economics), Associate Professor, System Analysis and Management Department, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: BulgakonaIrina966@gmail.com
SPIN code: 5323- 8720,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-17795877>

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-63-80>

Моделирование совместного движения роботизированного буксировщика и самолёта с помощью сигналов оптронной матрицы

Д. В. Афонин¹, А. С. Печурин¹, С. Ф. Яцун¹ ✉¹ Юго-Западный государственный университет

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Серьёзная загруженность аэропортов транспортно-авиационной и грузовой авиацией создает проблему для наземной логистики, серьёзно усложняя работу буксировочной аэродромной системы и персонала, что влечёт за собой издержки, связанные с задержкой поставок или простоя оборудования. Выйти из подобной ситуации позволит применение средств автоматического перемещения воздушных судов, способных круглосуточно и быстро буксировать самолёты по аэродрому, следуя оптимальной траектории.

Цель исследования. Создание математической модели и алгоритма управления автономным совместным движением колёсного авиационного тягача и воздушного судна, где управление основано на сигналах оптронной матрицы.

Методы. Достижение поставленной цели потребовало решения задач: описания динамической модели связанных между собой упругим элементом колёсных тел; создание модели обратной связи, основанной на группе оптопар, детектирующих контрастную линию; описание логических условий, позволяющих определить положение объекта относительно контрастной линии. Для описания динамики колёсной платформы использовались уравнения Лагранжевой динамики, а также численные методы математического моделирования. В качестве инструмента для оценки положения системы относительно контрастной линии рассматривается оптронная матрица.

Результаты. Разработана математическая модель, позволяющая исследовать движение системы и раскрыть взаимодействие элементов системы. Разработан адаптивный алгоритм управления движением системы на основе обратных связей дискретного типа. Рассмотрен пример управления системой при движении по прямой с прохождением поворотов под углом 90°. Предложена комбинированная система торможения, при которой формируются распределённые тормозные усилия, как на воздушном судне, так и буксировщике.

Заключение. В результате проведенного математического моделирования было установлено, что система колёсных тел, связанная силой упругости, способна совершать управляемое движение вдоль прямой и при прохождении крутых поворотов, опираясь на показания оптронной матрицы; приведены соответствующие графики.

Ключевые слова: авиационный робот-буксировщик; математическое моделирование системы колёсных тел; оптико-электронная матрица; система управления авиационным колёсным буксиром.

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».

© Афонин Д. В., Печурин А. С., Яцун С. Ф., 2022

Для цитирования: Афонин Д. В., Печурин А. С., Яцун С. Ф., Моделирование совместного движения роботизированного буксировщика и самолёта с помощью сигналов оптронной матрицы // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(3): 63-80. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-63-80>.

Поступила в редакцию 23.08.2022

Подписана в печать 14.09.2022

Опубликована 30.09.2022

Simulation of the Joint Movement of a Robotic-Towing Vehicle and an Aircraft Using Signals from an Optocoupler Matrix

Dmitrii V. Afonin ¹, Alexander S. Pechurin ¹, Sergei F. Yatsun ¹ ✉

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

Actuality. The heavy workload of airports with transport and cargo aviation creates a problem the land logistics, that seriously complicates the work of the airfield towing system and personnel working processes. That entails expenses associated with delayed deliveries or equipment downtime. The usage of the automatic aircraft movement systems, which are capable of towing aircraft round the clock and quickly along the airfield, following the optimal trajectory allows to avoid such situations.

Purpose of research. Creation of the mathematical model and the control algorithm for the autonomous joint movement of a wheeled aircraft towing vehicle and an aircraft, where the control is based on the signals of an optocoupler array.

Methods. Achieving this goal required solving the following problems: describing of a dynamic model of wheeled bodies interconnected by an elastic element; creation of a feedback model based on a group of optocouplers detecting a contrast line; description of the logical conditions that allow determining the position of the object relative to the contrast line. To describe the dynamics of the wheeled platform, the equations of Lagrangian dynamics, as well as the numerical methods of mathematical modeling, were used. An optocoupler array is considered as a tool for estimating the position of the system relative to the contrast line.

Results. A mathematical model, which explores the system movement and reveals the interaction of the system elements has been developed. An adaptive algorithm based on the discrete type feedback for the system managing is developed. An example of the control system when moving in a straight line with the passage of turns at an angle of 90 degrees is considered. A combined braking system in which the distributed brake efforts both on a aircraft and the tower are formed is proposed.

Conclusion. As a result of the mathematical modeling, it was found that the system of wheeled bodies, bound by the force of elasticity, is able to perform controlled movements along a straight line and when passing sharp turns, based on the readings of the optocoupler matrix; corresponding graphs are shown.

Keywords: aircraft tug robot; mathematical modeling of the system of wheeled bodies; optoelectronic matrix; aircraft wheeled tug control system.

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

Funding: The study was carried out with the support of the Strategic Project "Priority-2030. Creation of robotic tools to expand human functionality".

For citation: Afonin V. D., Pechurin S. A., Yatsun F. S. Simulation of the Joint Movement of a Robotic-Towing Vehicle and an Aircraft Using Signals from an Optocoupler Matrix. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(3): 63-80 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-63-80>.

Received 23.08.2022

Accepted 14.09.2022

Published 30.09.2022

Введение

Развитие авиационной техники связано не только с созданием и модернизацией самолетов, но и с разработкой новых средств, непосредственно обеспечивающих полеты. Постоянный рост авиаперевозок, а также увеличение количества самолетов создает проблему для логистики современных аэропортов. Для осуществления наземных маневров с воздушными судами (ВС) применяют буксировочную аэродромную систему (БАС), что позволяет значительно снизить шум и загрязнение воздуха вблизи аэропорта, а также уменьшить неэффективный расход ресурса авиационных двигателей и обеспечить значительную экономию авиационного топлива [1, 2]. В то же время, буксировка ВС является трудоемким и небезопасным процессом, требующим привлечения высококвалифицированных специалистов. Эффективность БАС определяется слаженностью действий членов бригады, которые следят за выдерживанием безопасных расстояний между элементами конструкции ВС и другими ВС, а также элементами инфраструктуры аэропорта, с целью исключения повреждения воздушного судна. Одним из путей повышения безопасности и быстродействия систем буксировки ВС, является переход к новым технологиям буксировки ВС на основе применения роботизированных мобильных буксировщиков (РМБ). Роботизи-

рованная БАС (РБАС), позволяет значительно сократить численность буксировочной бригады, повысить безопасность и обеспечить максимальную скорость движения ВС. В развитых странах мира разрабатываются новые виды БАС, способные заменить стандартные аэродромные тягачи, управляемые человеком. Например, компания TNA Aviation Technologies для перемещения пассажирских самолетов с максимальной взлетной массой от 9 до 60 т предлагает использовать буксировщик-робот Tugmaxxe. Компания WheelTug, предлагает использовать вместо аэродромного тягача специальное моторизированное колесо, установленное на передней стойке шасси самолета, что позволяет ВС самостоятельно перемещаться по территории аэропорта. Для создания таких систем необходимо разработать математические модели объекта управления (РБАС) и среды функционирования, которые адекватны реальным физическим процессам. Особое внимание должно быть уделено оценке вектора состояния и алгоритмам управления, обеспечивающим требуемые динамические качества системы с одновременным обеспечением стабильности в условиях возможной параметрической неопределенности.

Материалы и методы

РБАС рассматривается как человеко-машинная система [3], включающая оператора, человеко-машинный интер-

фейс, роботизированный мобильный буксировщик (РМБ), модуль захвата переднего колеса (СУ), воздушного судна (ВС), систему предупреждения столкновений (СПС), блок управления (БУ) (рис.1). Эффективность системы определяется степенью согласованности (синхронности) работы элементов этой системы. Оператор, являясь лицом принимающим решение (ЛПР), на основании анализа информации о состоянии окружающей среды, формирует задание для движения РМБ и ВС в виде набора точек, расположенных в пространстве аэродрома в соответствии с выбранной стратегией, блок планирования определяет параметры траектории. СПС состоит из дальномеров, системы технического зрения (СТЗ1), (СТЗ2), навигация РБАС осуществляется с помощью датчиков, установленных на РМБ (датчик отклонения (ДО), одомер, GPS, лидар), которые позволяют определять реальное положение РМБ и вычислять отклонение реального положения от заданного [4]. БУ формирует управляющие напряжения, поступающие на электроприводы РМБ, и тормозную систему ВС.

Рассмотрим сценарии функционирования РБАС при выполнении задач передвижения ВС.

1. Дистанционное управление, при котором, оператор осуществляет постоянный контроль движения РБАС, а РМБ выполняет заданные оператором, управляемые движения.

2. Комбинированный режим, при котором периодически в определенные моменты времени оператор осуществляет контроль и управление РМБ, а, в остальном, оператор не контролирует положение РМБ.

3. Автономное управление, при котором оператор не контролирует положение РМБ, который осуществляет автономное управляемое движение по заданной траектории.

Роботизированный мобильный буксировщик (рис. 2) представляет собой колёсную платформу [5,6], построенную по схеме робота с дифференциальным приводом – движение которого основано на двух независимых ведущих колесах, размещенных по обе стороны корпуса робота.

РМБ (рис. 2) состоит из корпуса 1, ведущего колеса левого 2, ведущего колеса правого 3, поворотного колеса 4, оптической матрицы 5, электроприводов 6 и 7, дальмеров 8, одометра 9, бортового вычислителя 10, GPS 11, модуль захвата переднего колеса 12, СТЗ13.

Перемещение модуля захвата переднего колеса (СУ) 12 осуществляется с помощью электроприводов ведущих колес РМБ, при этом СТЗ 13 и дальмеры 8 обеспечивают контроль за положением и ориентацией РМБ относительно переднего колеса ВС. Управление движением РМБ в этом режиме производится автоматически по специальному алгоритму, схема которого приведена на рис. 3.

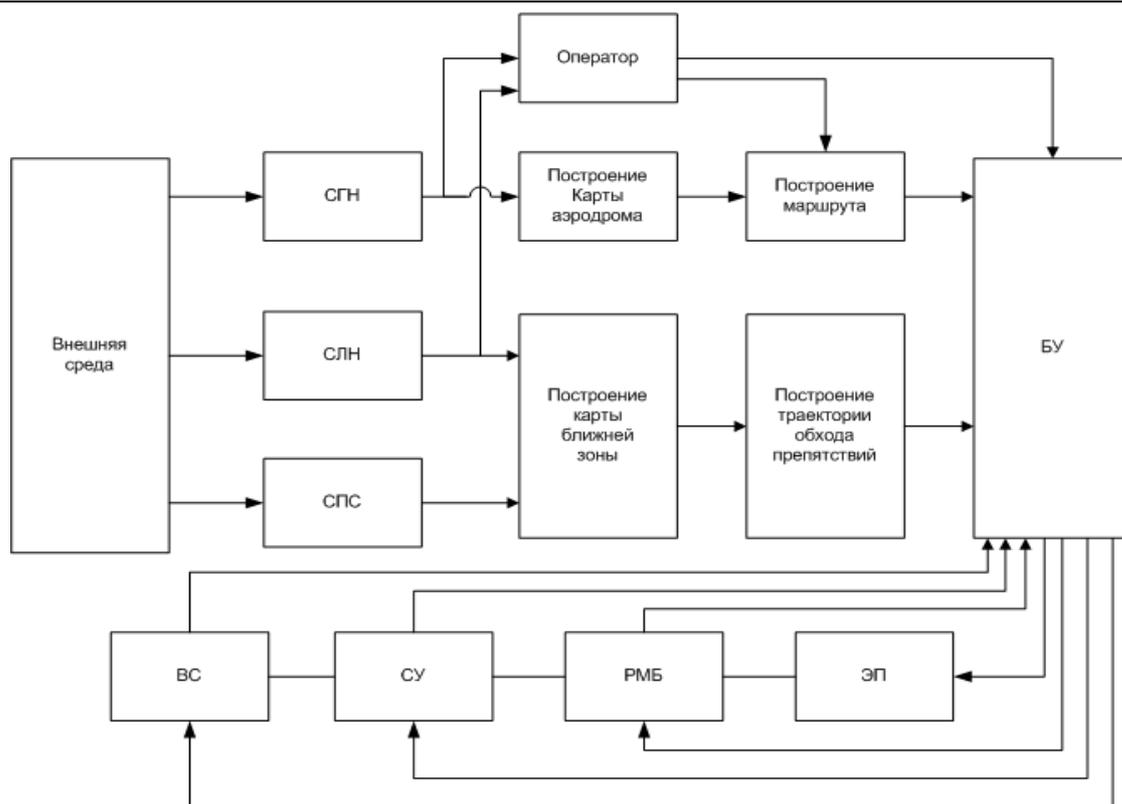


Рис. 1. Структурная схема роботизированной БАС

Fig. 1. Block diagram of a robotic ATS (Aircraft Towing System)

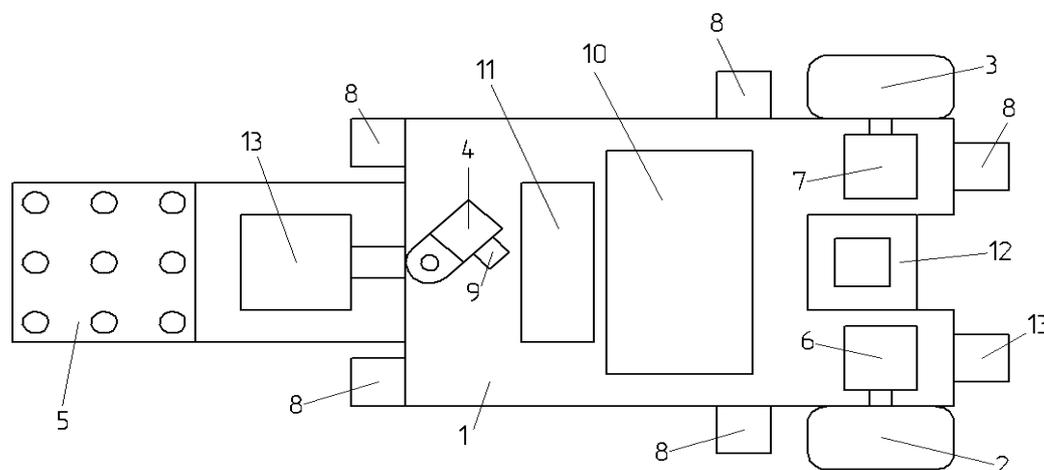


Рис. 2. Структурная схема РМБ

Fig. 2. Structural scheme RMTV (Robotic Mobile Towing Vehicle)

Математическое моделирование

Разработана математическая модель РБАС, схема которой приведена на рис. 4. РБАС состоит из двух секций: ВС и РМБ, которые соединены между

собой шарниром и представляют собой трехколесные мобильные платформы. Движение происходит в горизонтальной плоскости по шероховатой поверхности. Секция РМБ обозначена $A_1B_1C_1$, а секция с ВС, соответственно $A_2B_2C_2$.



Рис. 3. Алгоритм сцепки

Fig. 3. Hitch algorithm

Точка D_2 определяет положение переднего колеса ВС на платформе РМБ и принадлежит как РМБ, так и ВС. На рис. 4 обозначены основные геометрические и кинематические конструктивные параметры: ω_{11}, ω_{12} – угловая скорость соответственно левого и правого бортовых колес РМБ; ω_{21}, ω_{22} – угловая скорость соответственно левого и правого бортовых колес ВС; ϕ_1 – угол поворота платформы РМБ, отсчитываемый от оси Ox ; ϕ_2 – угол поворота ВС, отсчитываемый от оси Ox .

Математическая модель РБАС [7-12], позволяющая определить зависимость координат центра масс ВС $C_2 = (X_{C_2}, Y_{C_2})$ от управляющих сил F_{11}, F_{12} , основывается на уравнениях динамики.

Система дифференциальных уравнений движения РМБ в системе координат ⁽¹⁾ имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{V}_{O_1}^{(1)} &= \frac{BR_R + BR_L + F_{11} + F_{12} - P_{21x}^{(1)} + m_{C_1} \cdot |O_1C_1| \cdot \dot{\phi}_1^2 - \mu_{V_{O_1}} \cdot V_{O_1}^{(1)}}{m_1 + \frac{2 \cdot J_{W_1}}{r_{W_1}^2}} \\ \ddot{\phi}_1 &= \frac{|A_1O_1| \cdot (BR_R + F_{11} - F_{12} - BR_L) - P_{21y}^{(1)} \cdot |O_1D_1| - m_{C_1} \cdot |O_1C_1| \cdot \dot{\phi}_1 \cdot V_{O_1}^{(1)} - \mu_{\dot{\phi}_1} \cdot \dot{\phi}_1}{J_1 + \frac{|A_1O_1|^2}{r_{W_1}^2} \cdot J_{W_1}} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Угловая и линейная скорость движения РМБ находятся с помощью численного метода интегрирования и представлены уравнениями (2) и (3) соответственно:

$$V_{O_i}^{(1)} = V_{O_{i-1}}^{(1)} + \dot{V}_{O_i}^{(1)} \cdot dt; \quad (2)$$

$$\dot{\phi}_i = \dot{\phi}_{i-1} + \ddot{\phi}_i \cdot dt. \quad (3)$$

Переход из локальной системы координат РМБ в глобальную описывается уравнениями:

$$\bar{V}_{O_1}^{(0)} = T_{10} \cdot [V_{O_1}^{(1)} \quad 0]^T; \quad (4)$$

$$\bar{r}_{D_1}^{(0)} = \bar{S}_1^{(0)} + T_{10} \cdot [|O_1D_1| \quad 0]^T; \quad (5)$$

$$\bar{r}_{C_1}^{(0)} = \bar{S}_1^{(0)} + T_{10} \cdot [|O_1C_1| \quad 0]^T, \quad (6)$$

где $T_{10} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_1) & -\sin(\varphi_1) \\ \sin(\varphi_1) & \cos(\varphi_1) \end{bmatrix}$ – матрица поворота РМБ вокруг оси, а $\bar{S}_i^{(0)} = \bar{S}_{i-1}^{(0)} + \bar{V}_{O_i}^{(0)} \cdot dt$.

Система дифференциальных уравнений движения ВС в системе координат ⁽²⁾ имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{V}_{O_2}^{(2)} = \frac{P_{12x}^{(2)} + m_{C_2} \cdot |O_2C_2| \cdot \dot{\varphi}_2^2 - \mu_{V_{O_2}} \cdot V_{O_2}^{(2)}}{m_2 + \frac{2 \cdot J_{W_2}}{r_{W_2}^2}} \\ \ddot{\varphi}_2 = \frac{|A_2O_2| \cdot (PBR_R - PBR_L) P_{12y}^{(2)} \cdot |O_2D_2| - m_{C_2} \cdot |O_2C_2| \cdot \dot{\varphi}_2 \cdot V_{O_2}^{(2)} - \mu_{\dot{\varphi}_2} \cdot \dot{\varphi}_2}{J_2 + \frac{|A_2O_2|^2}{r_{W_2}^2} \cdot J_{W_2}} \end{cases} \quad (7)$$

Переход из локальной системы координат ВС в глобальную описывается с помощью уравнений:

$$\bar{V}_{O_2}^{(0)} = T_{20} \cdot [V_{O_2}^{(2)} \quad 0]^T; \quad (8)$$

$$\bar{r}_{D_2}^{(0)} = \bar{S}_2^{(0)} + T_{20} \cdot [|O_2D_2| \quad 0]^T; \quad (9)$$

$$\bar{r}_{C_1}^{(0)} = \bar{S}_2^{(0)} + T_{20} \cdot [|O_2C_2| \quad 0]^T, \quad (10)$$

где $T_{20} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_2) & -\sin(\varphi_2) \\ \sin(\varphi_2) & \cos(\varphi_2) \end{bmatrix}$ – матрица поворота ВС вокруг оси.

Сила $\bar{P}_{21} = -\bar{P}_{12}$ является связующим элементом РМБ и ВС, т.е. во время управляемого движения РМБ происходит растяжение или сжатие упругого элемента, что, как следствие, и порождает силу $\bar{P}_{21} = -\bar{P}_{12}$, которая в свою очередь приводит к движению ВС.

Определение значения силы $\bar{P}_{21} = -\bar{P}_{12}$ и её угла поворота α происходит в соответствии уравнениями:

$$\begin{bmatrix} P_{21x}^{(0)} \\ P_{21y}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_X & 0 \\ 0 & C_Y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{D_1} - X_{D_2} \\ Y_{D_1} - Y_{D_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu_X & 0 \\ 0 & \mu_Y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{d(D_{1x} - D_{2x})}{dt} \\ \frac{d(D_{1y} - D_{2y})}{dt} \end{bmatrix}; \quad (11)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{Y_{D_1} - Y_{D_2}}{X_{D_1} - X_{D_2}}\right), \quad (12)$$

где $X_{D_1}; Y_{D_1}$ – координаты точки D_1 , принадлежащей РМБ; $X_{D_2}; Y_{D_2}$ – координаты точки D_2 , принадлежащей ВС; C_X, C_Y – коэффициенты упругости; μ_X, μ_Y – коэффициенты вязкости.

Переход силы $\bar{P}_{21} = -\bar{P}_{12}$ из глобальной системы координат в локальные системы РМБ и ВС происходит с помощью уравнений:

$$\bar{P}_{12}^{(0)} = \bar{P}_{21}^{(0)} \quad (13)$$

$$\bar{P}_{21}^{(1)} = T_{10}^{-1} \cdot \bar{P}_{21}^{(0)} \quad (14)$$

$$\bar{P}_{12}^{(1)} = T_{20}^{-1} \cdot \bar{P}_{12}^{(0)}. \quad (15)$$

Схема движения ВС и РМБ по заданной траектории в виде отрезка прямой показана на рис. 4. X_0OY_0 – неподвижная система координат, ось $O X_0$ параллельна контрастной линии; $X_1C_1Y_1$ – подвижная система координат, связанная с РМБ; $X_2C_2Y_2$ – подвижная система координат, связанная с ВС; X_MMY_M – подвижная система координат, связанная с оптронной матрицей.

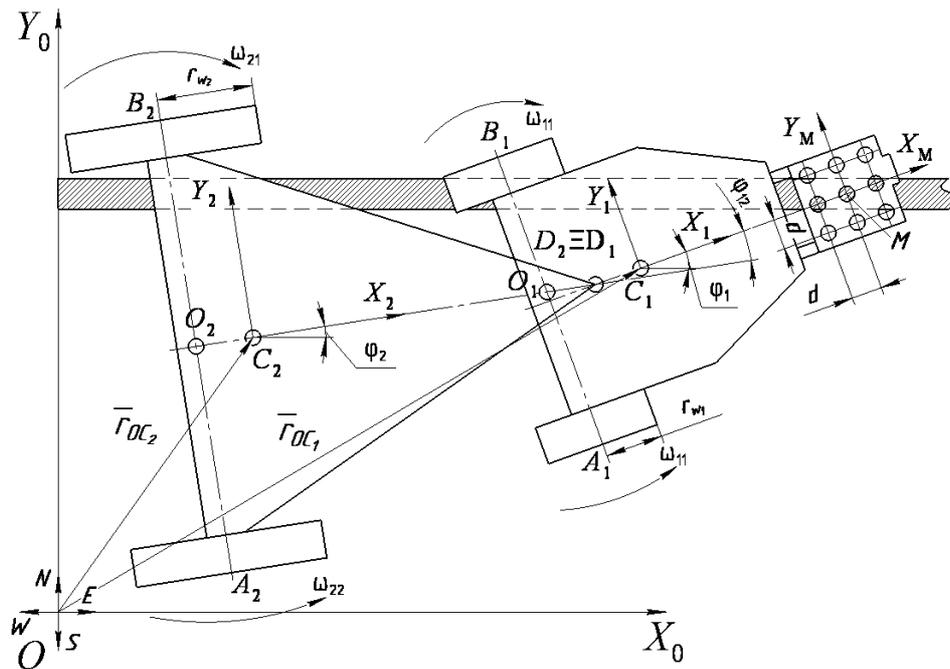


Рис. 4. Схема совместного движения РМБ и ВС

Fig. 4. Scheme of joint movement RMTV and aircraft

Система управления

Системой управления РБАС решается задача минимизации отклонения

траектории движения от заданной оператором. Алгоритм работы [13-17] роботизированного буксировщика представлен на рис. 5.

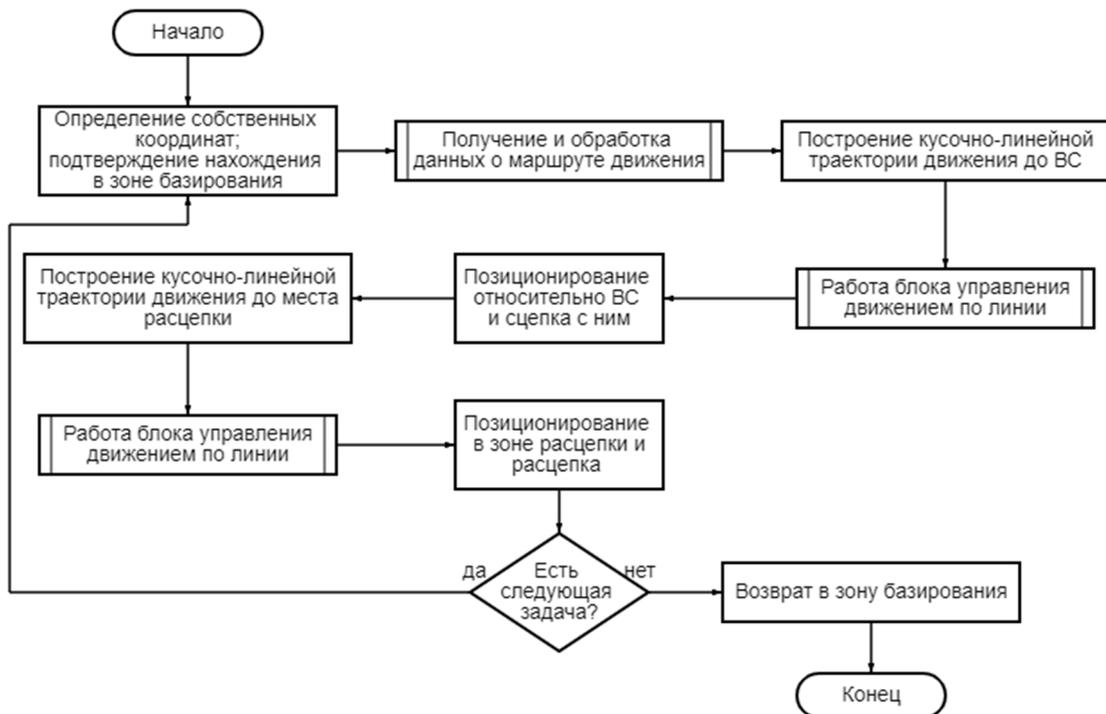


Рис. 5. Общий алгоритм работы РМБ

Fig. 5. General algorithm of RMTV operation

Для контроля за положением РБАС относительно контрастной линии (КЛ), применяется оптронная матрица (ОМ) (рис. 6), что позволяет оценивать отклонение реального положения РБАС от заданного с точностью, определяемой расстоянием между оптопарами [18-19]. Принято, что отраженным от контрастной линии сигналам присваивается 1, в противном случае 0.

Желаемое положение РБАС задается подвижной точкой M^* в соответствии с уравнениями [20-21]: при движении вдоль оси X_0O ;

$$\bar{M}^* = [M_x^*, M_y^*]^T = \left[\sum_{j=0}^{n=5} a_j \cdot t^j, H \right]^T; \quad (16)$$

при движении вдоль оси OY_0

$$\bar{M}^* = [M_x^*, M_y^*]^T = \left[L, \sum_{j=0}^{n=5} a_j \cdot t^j \right]^T. \quad (17)$$

Реальное положение ОМ определяет точка M (рис. 6 б)). Величину ошибки (отклонения центра ОМ от желаемого положения) определим по формуле

$$\bar{e} = \bar{M}^* - \bar{M}, \quad \bar{e} = \begin{bmatrix} M_x^* - M_x \\ M_y^* - M_y \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Выходные сигналы оптронной матрицы представим в виде матрицы M

$$M = [C_{11} \ C_{12} \ C_{13}; C_{21} \ C_{22} \ C_{23}; C_{31} \ C_{32} \ C_{33}].$$

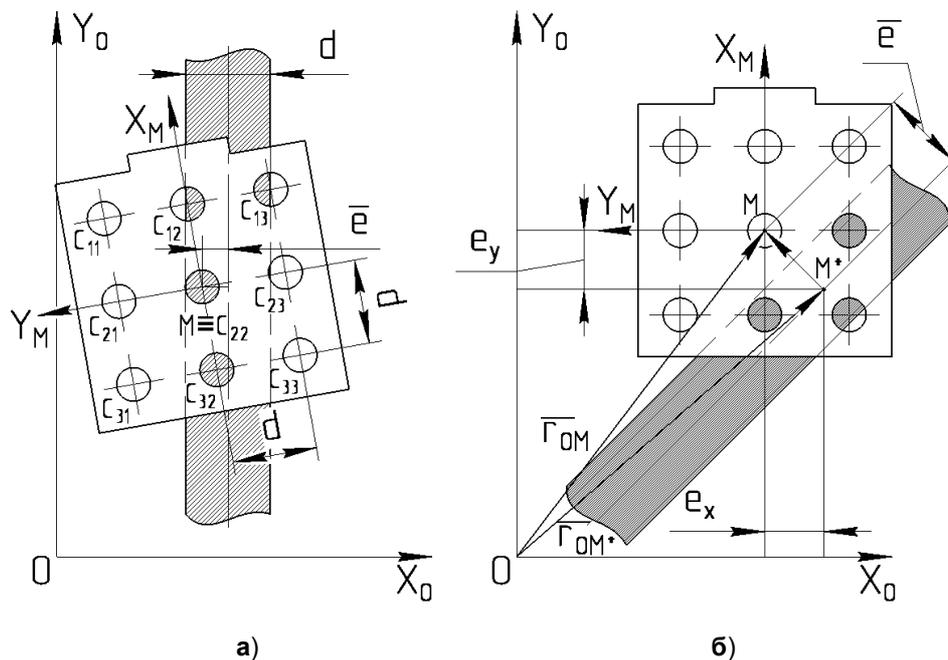


Рис. 6. Схемы определения положения ОМ над КЛ: **а** – при допустимом отклонении, **б** – при недопустимом отклонении

Fig. 6. Position detection schemes optocoupler matrix (OM) above contrast line (CL): **a** – with an acceptable difference; **b** – with an unacceptable difference

Различные позиции ОМ при движении РМБ относительно КЛ представ-

лены на рис. 7. В случае движения ОМ внутри интервала (рис. 7 а)), матрица

выходных значений светодиодов имеет вид – $M=[010;010;010]$. Если оптронная матрица имеет вид $M=[001;010;100]$ и $M=[000;111;000]$ (рис. 7 б), в)), то аппарат повернут на угол $\varphi_1 \approx +45^\circ$ и $\varphi_1 \approx +90^\circ$ относительно линии, что свидетельствует о необходимости корректировки положения.

Особого внимания требуют случаи, представленные на рис. 7 г) и 7 д), поскольку угол поворота относительно линии равен $90^\circ \leq \varphi_1 \leq 180^\circ$, они обу-

словлены реакцией на возмущение или дестабилизирующие воздействия со стороны ВС.

Поскольку в случаях г) и д) (см. рис. 7) выходные значения матриц одинаковы со случаями а), б) (см. рис. 7), необходимо описание программного инструмента, позволяющего верно интерпретировать текущее состояние матрицы. В качестве подобного инструмента предлагается использовать сравнение состояний матриц на текущей и предыдущей итерациях.

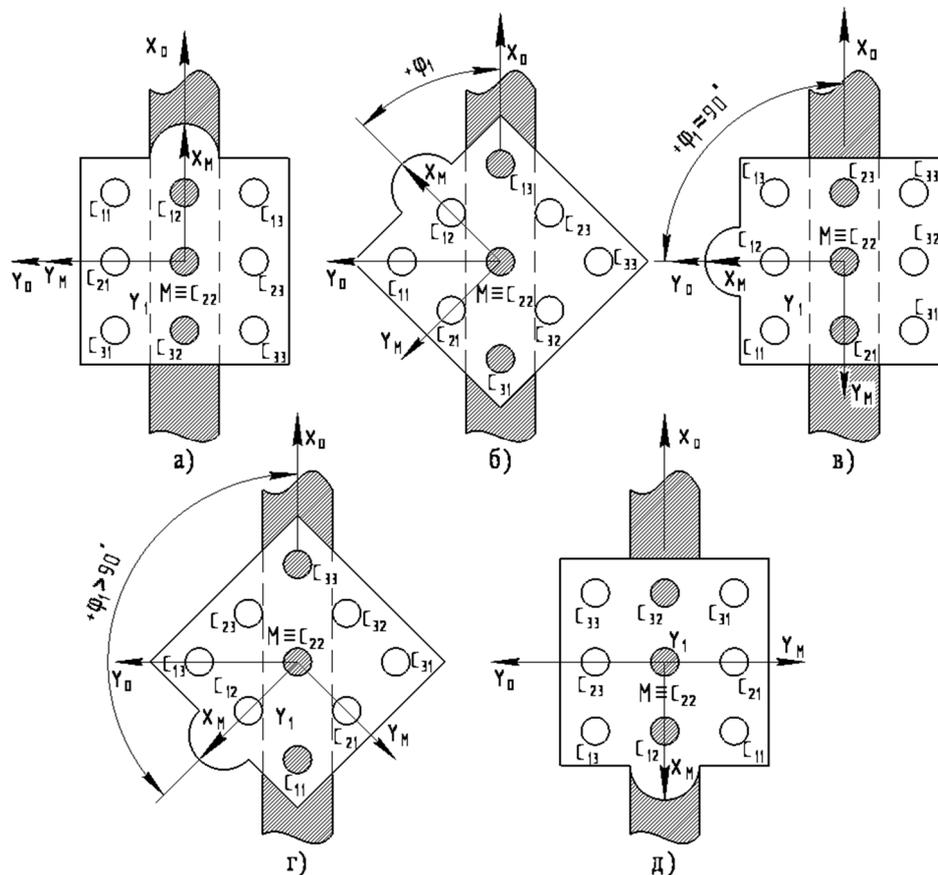


Рис. 7. Схемы определения положения ОМ над КЛ

Fig. 7. Schemes for determining the position of the OM over the CL

Силы, создаваемые колёсами, рассчитываются исходя из показаний оп-

тронной матрицы и логических условий, представленных ниже.

Управляющие напряжения [22-24] высчитываются исходя из:

$$\bar{U} = \begin{bmatrix} U_{R_w} \\ U_{L_w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{c_1} & 0 \\ 0 & c_{c_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_0 \\ U_0 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где

$U_0 = K_p \cdot (V_C^* - V_C) + K_I \cdot (\int V_C^* - V_C \cdot dt) + K_D \cdot ((d(V_C^* - V_C)) / dt)$, C_{c_1}, C_{c_2} – корректирующие коэффициенты, зависящие от состояния оптронной матрицы М. Коэффициенты C_{c_1}, C_{c_2} зависят от скорости движения и состояния М.

Условия перехода в режим корректировки движения:

Если $C_{22} = 1$ и $C_{12} = 1$ и $C_{32} = 1$, то корректировка положения не требуется и $C_{c_1} = 0, C_{c_2} = 0$;

Если $M \neq [010, 010, 010]$, то требуется корректировка положения и тогда C_{c_1} и $C_{c_2} \in |0, 0.1, \dots, 1|$;

Если $|\bar{e}| \rightarrow 0.5 \cdot d + d \cdot \sqrt{2}$, то C_{c_1} и $C_{c_2} \rightarrow 1$.

Точность положения ОМ относительно КЛ определяется параметром d . Если выполнено условие $O_0 O_1 < |d|$, то считается, что погрешность отсутствует. Ориентация ОМ определяется углом φ_1 .

Оценка интервала ошибки по показанию элементов оптронной матрицы:

Если $C_{22} = 1$, то $|\bar{e}| \in [0; 0,5d]$;

Если $C_{22} \neq 1$ и ($C_{21} = 1$ или $C_{23} = 1$), то $|\bar{e}| \in [0; 1,5d]$;

Если $C_{22} \neq 1$ и ($C_{11} = 1$ или $C_{13} = 1$ или $C_{31} = 1$ или $C_{33} = 1$), то

$$|\bar{e}| \in [0.5 \cdot d; 0.5 \cdot d + d \cdot \sqrt{2}].$$

Результаты и их обсуждение

Представленные результаты моделирования были достигнуты при следующих массогабаритных характеристиках:

$m_{c_1} = 2000$ кг – масса РМБ без колёс,

$m_{w_1} = 200$ кг – масса колеса РМБ,

$m_1 = 2400$ кг – общая масса РМБ,

$r_{w_1} = 0.4$ м – радиус колеса РМБ,

$J_{w_1} = 0.5 \cdot (m_{w_1} \cdot r_{w_1}^2)$ кг · м² – момент

инерции колеса РМБ,

$$J_1 = J_{c_1} + m_{c_1} \cdot |O_1 C_1|^2 +$$

$$+ 2 \cdot m_{w_1} \cdot J_{w_1} = 5636.4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

общий момент инерции РМБ,

$m_{c_2} = 22000$ кг – масса ВС без колёс,

$m_{w_2} = 500$ кг – масса колеса ВС,

$m_2 = 23000$ кг – общая масса ВС,

$r_{w_2} = 0.45$ м – радиус колеса ВС,

$J_{w_2} = 0.5 \cdot (m_{w_2} \cdot r_{w_2}^2)$ кг · м² – момент инер-

ции колеса ВС, $J_2 = J_{c_2} + m_{c_2} \cdot |O_2 C_2|^2 +$

$+ 2 \cdot m_{w_2} \cdot J_{w_2} = 659930 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ общий мо-

мент инерции ВС.

На рис. 8 - 11 приведены результаты математического моделирования управляемого движения РБАС и ВС вдоль контрастной линии.

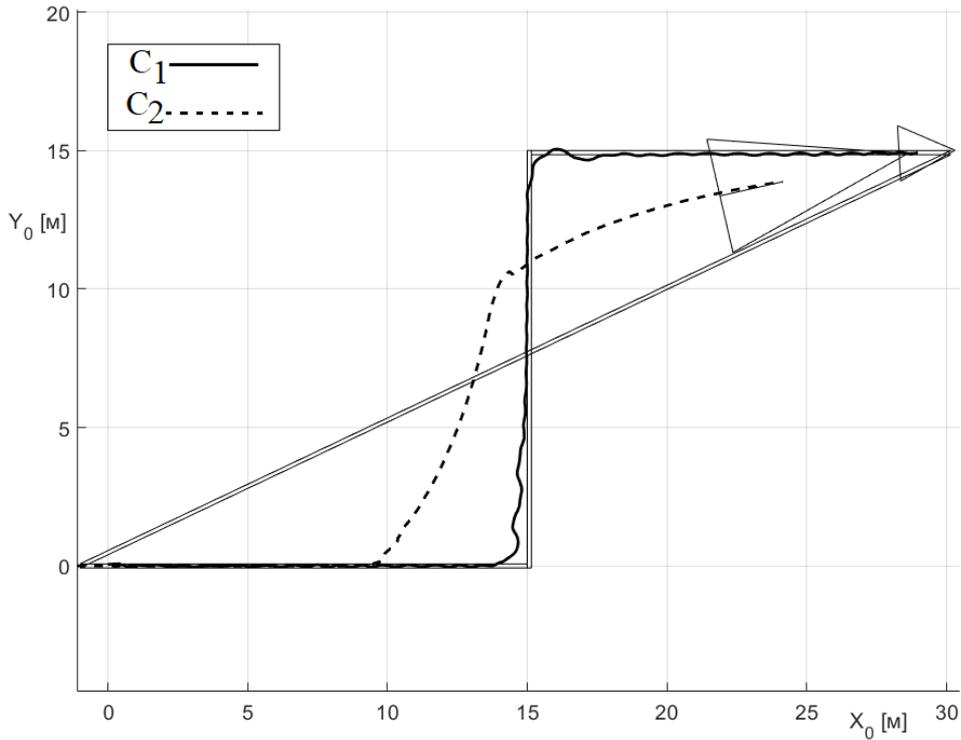


Рис. 8. Результат совместного управляемого движения РБАС

Fig. 8. The result of joint controlled movement robotic towing aircraft system (RTAS)

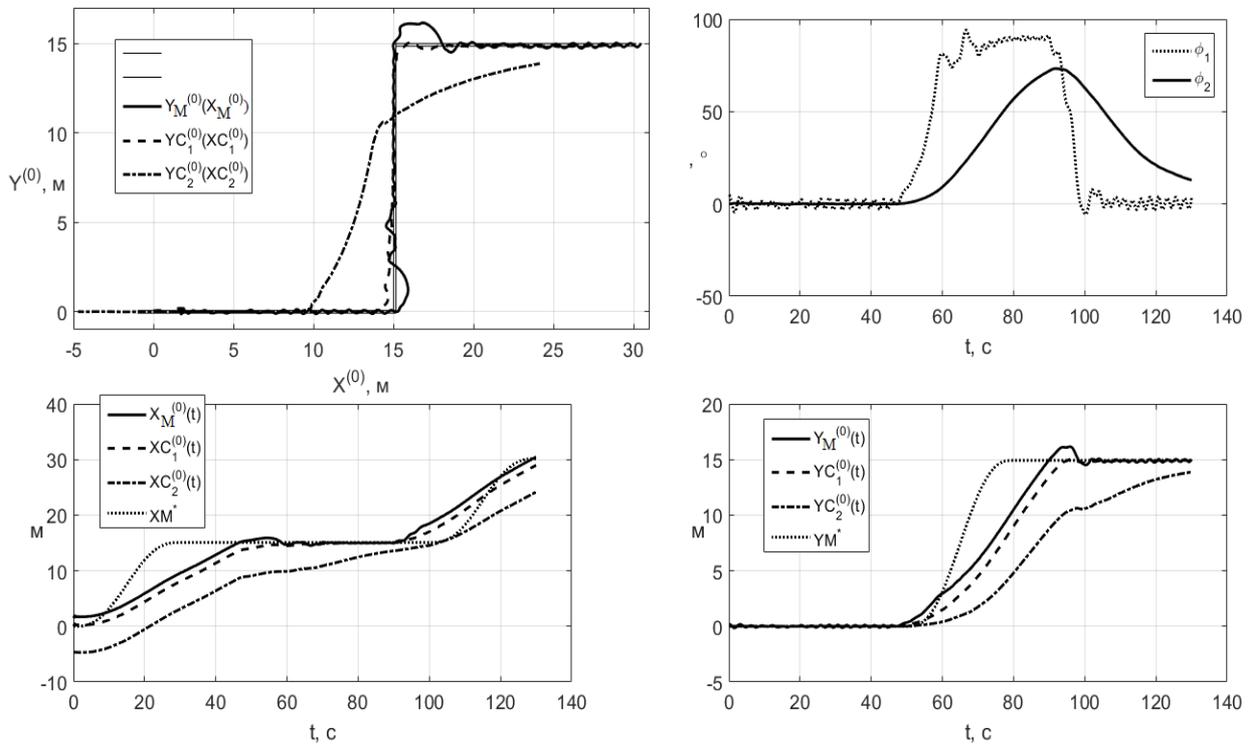


Рис. 9. Результаты моделирования совместного управляемого движения РБАС

Fig. 9. Simulation results of joint controlled motion RTAS

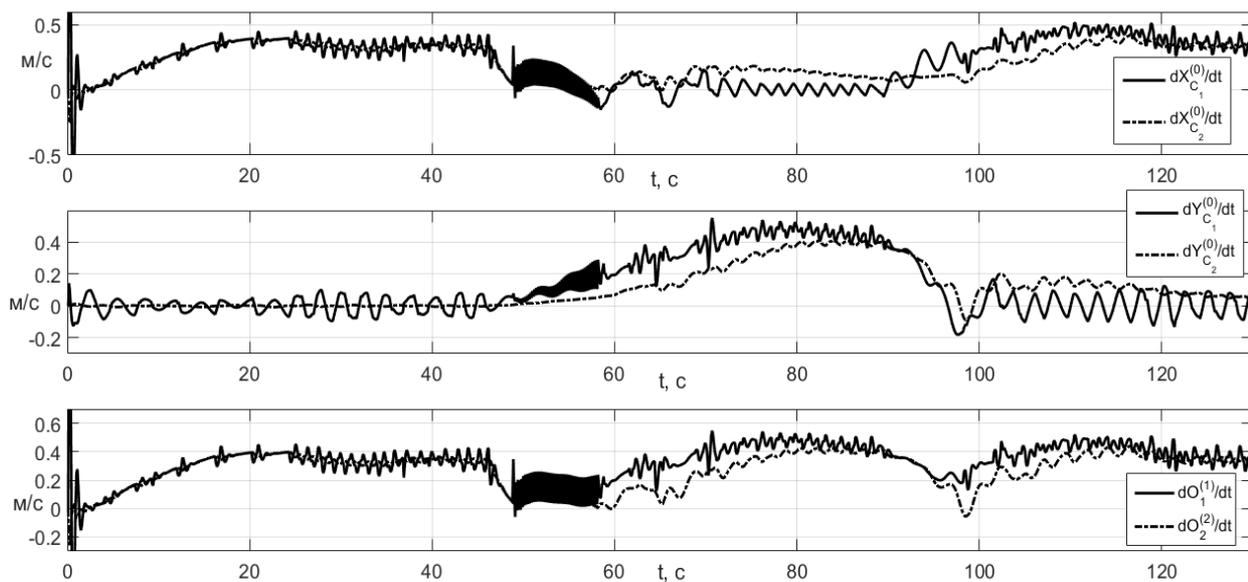


Рис. 10. Графики изменения скоростей РМБ и ВС

Fig. 10. Graphs of speeds changes RMTV and aircraft

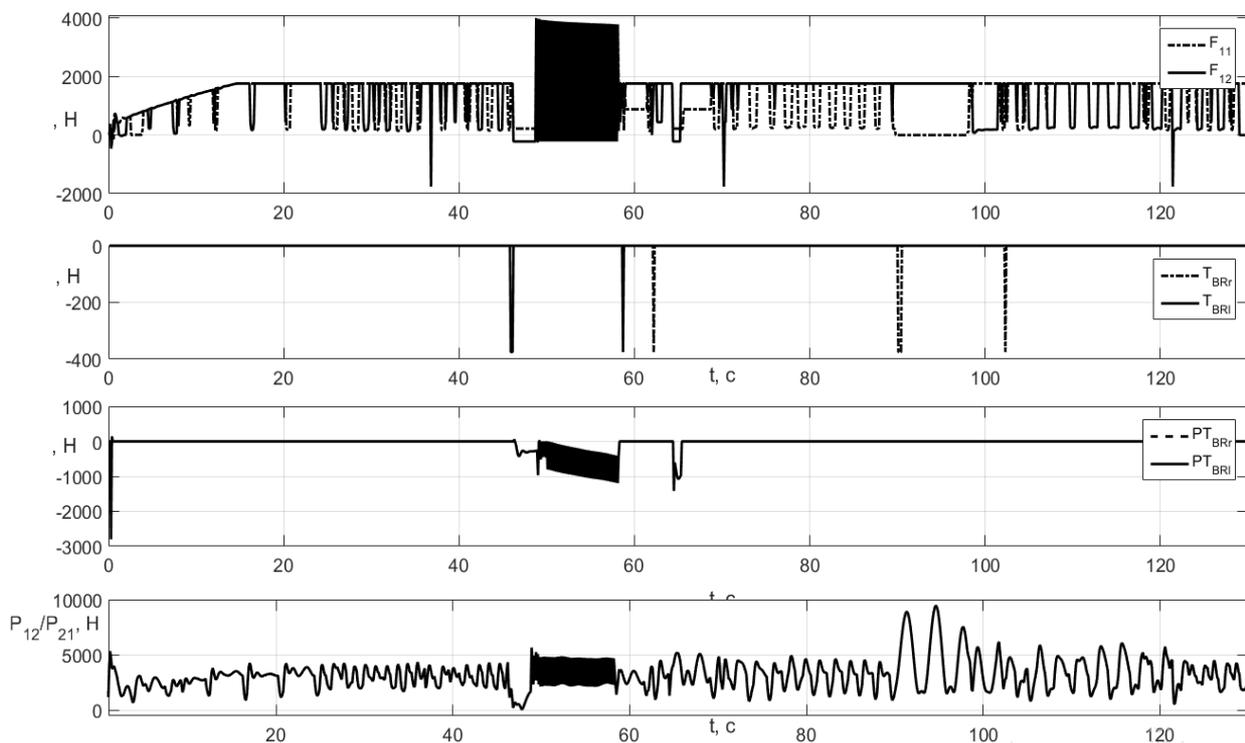


Рис. 11. Графики изменения: F_{11} , F_{12} – силы, создаваемые колёсами РМБ; T_{BRr} , T_{BRl} – тормозные усилия, создаваемые РМБ, PT_{BRr} , PT_{BRl} – тормозные усилия, создаваемые ВС

Fig. 11. Graphs of changes: F_{11} , F_{12} – forces generated by the wheels RMTV; T_{BRr} , T_{BRl} – braking force generated by RMTV; PT_{BRr} , PT_{BRl} – braking force generated by aircraft

Результаты моделирования демонстрируют, что система способна совершать управляемое движение, однако из-за больших значений массы и инерции на скоростях, превышающих 0.5 м/с, достигает критического рассогласования или теряет устойчивость. Также при заданном способе контроля траектория ВС имеет серьёзное рассогласование в состоянии поворота, что в дальнейшем ставит задачу разработки дополнительных систем контроля положения и дополнения алгоритмов управления.

Переработка алгоритмов работы тормозной системы, расширение логических ветвлений блока управления, увеличение размерности оптронной матрицы, а также использование нейронной сети позволит качественно улучшить точность движения по траектории.

Выводы

1. Разработан метод управления позиционированием роботизированной бук-

сировочной аэродромной системой, основанной на логической обработке сигналов оптронной матрицы, состоящей из оптических датчиков.

2. Предложена структурная схема аппарата - буксировщика, а также описан метод сцепки буксира и воздушного судна через связующий упругий элемент.

3. Приведены алгоритм и логика работы блока управления, а также синтез многоканального регулятора системы управления буксировщиком ВС.

4. Разработана математическая модель и проведено моделирование управляемого движения колёсной системы в режиме прохождения крутых поворотов.

5. Представлены результаты моделирования совместного движения, демонстрирующие работоспособность предложенного метода управления. Однако актуальной задачей является улучшение системы контроля самолёта для повышения качества движения.

Список литературы

1. Shi A. et al. Multi-robot Task Allocation for Airfield Pavement Detection Tasks // 6th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC). IEEE, 2021. P. 62-67.
2. Chernomorskiy A. I., Lelkov K. S., Kuris E. D. On one way to improve the accuracy of navigation system for ground wheeled robot used in aircraft parking // Smart Science. 2020. Vol. 8. №. 4. P. 219-226.
3. Афонин Д.В., Политов Е.Н., Тимофеев Е.А. Разработка робота-тягача для транспортировки самолетов по аэродрому // Наука молодых - будущее России: сборник научных статей 2-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых (13-14 декабря 2017 года): в 5 т. / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2017. Т. 5. С. 14-18.
4. de Vries T.J.A., van Heteren C., Huttenhuis L. Modelling and control of a fast moving, highly maneuverable wheelchair // Proceedings of the International Bio mechatronics Workshop 1999.6: 110-115.

5. Szczeńniak G. et al. Analysis of the chassis design for a highly mobile wheeled platform // *Journal of Measurement in Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 4. №. 2. P. 52-57.
6. Kundu A. S. et al. Design and performance evaluation of 4 wheeled omni wheelchair with reduced slip and vibration // *Procedia Computer Science*. 2017. Vol. 105. P. 289-295.
7. Martynenko Yu.G. Motion Control of Mobile Wheeled Robots // *Fundamental and Applied Mathematics*. 2005. № 8. P. 29-80.
8. Dhaouadi R., Hatab A. A. Dynamic modeling of mobile robots with differential drive using Lagrange and Newton-Euler methodologies: A unified framework // *Advances in Robotics & Automation*. 2013. Vol. 2. №. 2. P. 1-7.
9. Liang Z., Yuan J. Modeling and optimisation of high-efficiency differential-drive complementary metal-oxide-semiconductor rectifier for ultra-high-frequency radio-frequency energy harvesters // *IET Power Electronics*. 2019. Vol. 12. №. 3. P. 588-597.
10. Martins F. N., Sarcinelli-Filho M., Carelli R. A velocity-based dynamic model and its properties for differential drive mobile robots // *Journal of intelligent & robotic systems*. 2017. Vol.. 85. №. 2. P. 277-292.
11. Seegmiller N., Kelly A. High-fidelity yet fast dynamic models of wheeled mobile robots // *IEEE Transactions on Robotics*. 2016. Vol.. 32. № 3. P. 614-625.
12. Hendzel Z., Rykała Ł. Modeling the dynamics of a wheeled mobile robot with mechanic wheels using Lagrange equations of the second kind // *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. 2017. Vol.. 22. №. 1.
13. Iwendi C. et al. Robust navigational control of a two-wheeled self-balancing robot in a sensed environment // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 82337-82348.
14. Saenz A. et al. Speed control of an omnidirectional wheeled mobile robot using computed voltage control with visual feedback: Experimental results // *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2021. Vol. 19. №. 2. P. 1089-1102.
15. Никишин Б., Шорин В.С., Лисицкий Д.Л. Построение алгоритмов функционирования системы ориентации и навигации транспортных роботов // *Труды Российской конференции с международным участием «Технические и программные средства управления, контроля и измерения»*. М.: ИПУ РАН, 2010. С. 183-184.
16. Бартенев В.В., Яцун С.Ф. Анализ методов управления движением мобильных колесных роботов по заданной траектории // *Управляемые вибрационные технологии и машины: сборник научных трудов международной конференции*. Курск, 2012. С. 144-152.
17. Bartenev V. V. Dynamics of controlled motion of a mobile robot with two independent driving wheels: Ph. Southwestern State University. 2010.
18. Rafi R. H. et al. Design & implementation of a line following robot for irrigation based application // *2016 19th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)*. IEEE, 2016. С. 480-483.

19. Richter C., Bry A., Roy N. Polynomial trajectory planning for aggressive quadrotor flight in dense indoor environments // *Robotics research*. Springer, Cham, 2016. P. 649-666.

20. Wang H. et al. Smooth point-to-point trajectory planning for industrial robots with kinematical constraints based on high-order polynomial curve // *Mechanism and Machine Theory*. 2019. Vol. 139. С. 284-293.

21. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям / В. Г. Градецкий, В. Б. Вешников, С. В. Калиниченко, Л. Н. Кравчук. М.: Наука, 2001. С. 26-91, 275-294, 158.

22. Bartenev V.V., Yatsun S.F. Motion control of mobile wheeled robots on the base of the signal of optron matrix // *Proceedings of the 17th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. Saint Petersburg: State Research Center of the Russian Federation – Central Scientific & Research Institute Elektropribor, 2010. P. 279-284.

23. Feng L., Koren Y., Borenstein J. A model-reference adaptive motion controller for a differential-drive mobile robot // *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1994. P. 3091-3096.

24. Dhaouadi R, Sleiman M. Development of a modular mobile robot platform for motion-control education // *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2011. 5: 35-45.

References

1. Shi A. et al. Multi-robot Task Allocation for Airfield Pavement Detection Tasks. *6th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC)*. IEEE, 2021, pp. 62-67.

2. Chernomorskiy A. I., Lelkov K. S., Kuris E. D. On one way to improve the accuracy of navigation system for ground wheeled robot used in aircraft parking. *Smart Science*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 219-226.

3. Afonin D.V., Politov E.N., Timofeev E.A. Razrabotka robota-tyagacha dlya transportirovki samoletov po aerodromu [Development of a tractor robot for transporting aircraft around the airfield]. *Nauka molodykh - budushchee Rossii. Sbornik nauchnykh statei 2-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh* = [Science of the young - the future of Russia. Collection of scientific articles of the 2nd International scientific conference of promising developments of young scientists]. Kursk, 2017, vol. 5. pp. 14-18.

4. de Vries TJA, van Heteren C, Huttenhuis L. Modeling and control of a fast moving, highly maneuverable wheelchair. *Proceedings of the International Bio mechatronics Workshop*, 1999, 6: 110-115.

5. Szczęśniak G. et al. Analysis of the chassis design for a highly mobile wheeled platform. *Journal of Measurement in Mechanical Engineering*, 2016, vol. 4, no. 2, pp. 52-57.

6. Kundu A. S. et al. Design and performance evaluation of 4 wheeled omni wheelchair with reduced slip and vibration. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 105, pp. 289-295.

7. Martynenko Yu.G. Motion Control of Mobile Wheeled Robots. *Fundamental and Applied Mathematics*, 2005, no. 8, pp. 29-80.

8. Dhaouadi R., Hatab A. A. Dynamic modeling of mobile robots with differential drive using Lagrange and Newton-Euler methodologies: A unified framework. *Advances in Robotics & Automation*, 2013, vol. 2, no. 2, pp. 1-7.

9. Liang Z., Yuan J. Modeling and optimisation of high-efficiency differential-drive complementary metal-oxide-semiconductor rectifier for ultra-high-frequency radio-frequency energy harvesters. *IET Power Electronics*, 2019, vol. 12, no. 3, pp. 588-597.

10. Martins F. N., Sarcinelli-Filho M., Carelli R. A velocity-based dynamic model and its properties for differential drive mobile robots. *Journal of intelligent & robotic systems*, 2017, vol. 85, no. 2, pp. 277-292.

11. Seegmiller N., Kelly A. High-fidelity yet fast dynamic models of wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, vol. 32, no. 3, pp. 614-625.

12. Hendzel Z., Rykała Ł. Modeling the dynamics of a wheeled mobile robot with mechanic wheels using Lagrange equations of the second kind. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 2017, vol. 22, no. 1.

13. Iwendi C. et al. Robust navigational control of a two-wheeled self-balancing robot in a sensed environment. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 82337-82348.

14 Saenz A. et al. Speed control of an omnidirectional wheeled mobile robot using computed voltage control with visual feedback: Experimental results. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2021, vol. 19, no. 2, pp. 1089-1102.

15. Nikishin V.B., Shorin V.S., Lissitzky D.L. Postroenie algoritmov funktsionirovaniya sistemy orientatsii i navigatsii transportnykh robotov [Construction of algorithms for the functioning of the system of orientation and navigation of transport robots]. *Trudy Rossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Tekhnicheskie i programmnye sredstva upravleniya, kontrolya i izmereniya"* [Proceedings of the Russian Conference with International Participation "Technical and Software Management, Control and Measurement]. Moscow, IPU RAN Publ., 2010, pp. 183-184.

16. Bartenev V.V., Yatsun S.F. Analiz metodov upravleniya dvizheniem mobil'nykh kolesnykh robotov po zadannoi traektorii [Analysis of methods for controlling the movement of mobile wheeled robots along a given trajectory]. *Upravlyaemye vibratsionnye tekhnologii i mashiny. Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi konferentsii* [Controlled vibration technologies and machines. Collection of scientific papers of an international conference]. Kursk, 2012, pp. 144-152.

17. Bartenev V. V. Dynamics of controlled motion of a mobile robot with two independent driving wheels: Ph. Southwestern State University, 2010.

18. Rafi R. H. et al. Design & implementation of a line following robot for irrigation based application. *19th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT), IEEE*, 2016, pp. 480-483.

19. Richter C., Bry A., Roy N. Polynomial trajectory planning for aggressive quadrotor flight in dense indoor environments. *Robotics research*. Springer, Cham, 2016, pp. 649-666.

20. Wang H. et al. Smooth point-to-point trajectory planning for industrial robots with kinematic constraints based on high-order polynomial curve. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, vol. 139, pp. 284-293.

21. Gradetsky V. G., Veshnikov V. B., Kalinichenko S. V., Kravchuk L. N. *Upravlyаемое движение мобил'ных роботов по произвол'но ориентированным в пространстве поверхностям* [Controlled motion of mobile robots on surfaces arbitrarily oriented in space]. Moscow, Nauka Publ., 2001, pp. 26-91, 275-294, 158.

22. Bartenev V.V., Yatsun S.F. Motion control of mobile wheeled robots on the base of the signal of optron matrix. *Proceedings of the 17th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. Saint Petersburg: State Research Center of the Russian Federation - Central Scientific & Research Institute Elektropribor Publ., 2010, pp. 279-284.

23. Feng L., Koren Y., Borenstein J. A model-reference adaptive motion controller for a differential-drive mobile robot. *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1994, pp. 3091-3096.

24. Dhaouadi R, Sleiman M. Development of a modular mobile robot platform for motion-control education. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2011, 5: 35-45.

Информация об авторах / Information about the Authors

Афонин Дмитрий Вячеславович, аспирант кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Dmitrii V. Afonin, Post-Graduate Student of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Печурин Александр Сергеевич, аспирант кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Alexander S. Pechurin, Post-Graduate Student of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

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

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-81-97>

Метод определения источника сообщений на основе обработки времени их поступления

М. О. Таныгин¹, А. В. Плугатарев¹ ✉, С. И. Егоров¹, А. П. Локтионов¹

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

✉ e-mail: aplugatarev@bk.ru

Резюме

Целью исследования является создание метода определения источника сообщений в приёмнике, позволяющего на основе анализа характеристик распределения времени поступления сообщений повысить достоверность определения источника.

Методы. Аутентификация источника сообщений происходит на основе статистического анализа значений метаданных, которыми в данном исследовании и являются интервалы времени между сообщениями. За основу модели обработки метаданных взята известная модель поступления сообщений от целевого источника в сетях LoRaWAN. При этом определение источника производилось с помощью методов кодирования в режиме сцепления блоков, которые обеспечивают более высокую достоверность идентификации для сообщений небольшой длины, характерных для указанного типа сетей. С помощью численного моделирования были определены закономерностей изменения характеристик времени поступления сообщений в случае возникновения ошибки идентификации. Так же сформулировано правило принятия решения в случае невозможности проведения аутентификации на основе обработки содержимого идентификационных полей. Исследования показали эффективность применения модели определения источника в различных диапазонах параметров формирования последовательностей сообщений.

Результаты. Итогом проведенных исследований является разработка метода аутентификации, основанного на анализе времени поступления сообщений на приёмник, который отличается тем, что в качестве анализируемых данных использует характеристики распределения моментов высоких порядков для рядов временных задержек. Его использование в сочетании с методами кодирования в режиме сцепления сообщений обеспечивает снижение вероятности возникновения ошибки единичной замены сообщения в последовательности в 4 - 6 раз, по сравнению с методами, выполняющими идентификацию только по результатам обработки идентификаторов самих сообщений.

Заключение. Результат экспериментальных исследований показал возможность при помощи разработанного метода повысить достоверность определения аутентичности источника сообщений, возможность снижения числа переспросов, возникающих при обнаружении ошибок, возможность уменьшения размеров дополнительных полей идентификаторов в каждом сообщении. Результирующий эффект будет выражаться в общем повышении пропускной способности канала связи между удаленными компонентами распределенной системы.

Ключевые слова: сетевое взаимодействие; аутентификация; анализ метаданных.

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

Для цитирования: 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>.

Поступила в редакцию 17.06.2022

Подписана в печать 05.07.2022

Опубликована 30.09.2022

© Таныгин М. О., Плугатарев А. В., Егоров С. И., Локтионов А. П., 2022

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2022; 26(3): 81-97

Method of Determining the Source of Messages Based on Processing the Time of Their Receipt

Maxim O. Tanygin ¹, Aleksey V. Plugatarev ¹ ✉, Sergey I. Egorov ¹, Askold P. Loktionov ¹

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

✉ e-mail: aplugatarev@bk.ru

Abstract

Purpose of research is to create a method for determining the source of messages in the receiver, which allows, based on the analysis of the characteristics of the distribution of the time of receipt of messages, to increase the reliability of determining the source.

Methods. Authentication of the message source is based on statistical analysis of metadata values, which in this study are the time intervals between messages. The metadata processing model is based on the well-known model of receiving messages from the target source in LoRaWAN networks. At the same time, the source was determined using coding methods in the block coupling mode, which provide higher identification reliability for short-length messages characteristic of the specified type of networks. With the help of numerical modeling, the patterns of changes in the characteristics of the time of receipt of messages in the event of an identification error were determined. The decision-making rule is also formulated in case of impossibility of authentication based on processing the contents of identification fields. Studies have shown the effectiveness of the application of the source detection model in various ranges of parameters for the formation of message sequences.

Results. The result of the conducted research is the development of an authentication method based on the analysis of the time of receipt of messages to the receiver, which differs in that it uses the characteristics of the distribution of moments of high orders for a series of time delays as the analyzed data. Its use in combination with coding methods in the message concatenation mode reduces the probability of a single message replacement error in a sequence by 4-6 times, compared with methods that perform identification only based on the results of processing the identifiers of the messages themselves.

Conclusion. The result of experimental studies has shown the possibility of using the developed method to increase the reliability of determining the authenticity of the source of messages, the possibility of reducing the number of inquiries that occur when errors are detected, the possibility of reducing the size of additional identifier fields in each message. The resulting effect will be expressed in a general increase in the bandwidth of the communication channel between remote components of a distributed system.

Keywords: network interaction; authentication; metadata analysis.

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

For citation: 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>.

Received 17.06.2022

Accepted 05.07.2022

Published 30.09.2022

Введение

В большинстве информационных систем, где происходит обмен данными между её субъектами, используются механизмы для контроля целостности и аутентичности передаваемых данных. Подобный контроль, осуществляется с использованием соответствующих полей с дополнительной служебной информацией. Стремительное развитие науки и техники, крупных промышленных организаций и частных компаний привело к автоматизации большинства этапов деятельности и повышению требований к надёжности и экономии вычислительных ресурсов и ресурсов хранения данных. Процессы аутентификации в таких системах требуют использования ресурсов, которые напрямую не направлены на непосредственное выполнение задач, для которых система была спроектирована [1, 2]. Как правило, ко всем системам аутентификации предъявляются высокие требования к надёжности и производительности. Размер полей служебной информации должен быть минимальным, чтобы сократить избыточность данных и повысить пропускную способность коммутационного канала [3]. Таким образом, актуальным является исследование механизмов определения источника сообщений и контроля их целостности, основанных на метаданных самих сообщений или, иными словами, на информации, характеризующей непосредственно процедуры обработки и передачи сообщений.

Предпосылками к созданию подобных моделей и методов является то, что информационные сообщения, передаваемые по каналам связи, несут в себе не только полезную нагрузку и рассматриваемые служебные поля, но и некую метаинформацию, анализ которой может позволить понизить вероятность возникновения ошибки определения источника, или, наоборот, при сохранении требуемой достоверности, уменьшить размер дополнительных служебных полей и минимизировать вычислительные ресурсы и ресурсы хранения данных системы. К метаинформации единиц сетевого взаимодействия, которую предлагается использовать в данном исследовании, предлагается использовать временной интервал между поступлением сообщений на приёмник [4].

Предложенный в статье подход к повышению достоверности идентификации источника основан на анализе характеристик центральных моментов распределений высокого порядка, который сформирован на основе накопленных данных о временных диапазонах между поступлениями сообщений на приёмник.

Материалы и методы

Рассмотрим систему, в которой взаимодействуют источник и приёмник информации, при этом задача приёмника – контролировать аутентичность, целостность и порядок следования всех поступающих сообщений, игнорируя те

из них, которые выданы посторонними источниками. Источник, генерируя сообщения, добавляет к полезной нагрузке значение хеш-функции, формируемой из данных предыдущего сообщения. В приёмнике при проверке данных, хеш из полученного сообщения сравнивается с хешами, формируемыми из данных всех поступающих в течение некоторого сеанса связи сообщений [5, 6].

В научных работах ранее был предложен метод, достоверность принятия решения об атрибутах в котором определяется исходя из вероятности случайного совпадения, рассчитанной для блока целевого источника метрики с аналогичной метрикой для любого блока из множества анализируемых приёмником. Вероятность ошибки для них определится исходя из формулы 1, где степень $|U|$ определяется как произведение числа взаимодействующих устройств b на длину фрагментированного сообщения n , а длина атрибутивных данных обозначена H [7-8].

$$P^{\text{col}} = 1 - \left(1 - \frac{1}{2^{H-1}}\right)^{|U|}. \quad (1)$$

В описанном методе предполагается вероятность ошибки аутентификации. В свою очередь, модель определения источника сообщений, описываемая в данной работе, предлагается как следующий этап указанного метода, для повышения достоверности принятия решения.

На приёмник в некоторое временное окно поступает множество сообщений, которые формируют сеанс длиной

N . Каждое принятое сообщение получает уникальный порядковый номер i .

На первом этапе буферизации сообщений на приёмнике необходимо сформировать цепочки последовательностей сообщений. В процессе сетевого взаимодействия в течение одного сеанса, каждое поступившее сообщение n_i сравнивается с имитовставкой (хешем) всех уже пришедших сообщений, порядковый номер поступления которых меньше i . Условием для включения сообщения в последовательности является равенство хеша (имитовставки), сформированной из данных предыдущего блока цепочки содержимого [9-10]. При совпадении хэша, считаем принятое сообщение продолжением формируемой цепочки сообщений. При этом фиксируется временной интервал между n_i и n_{i-1} .

Для дальнейшей обработки данных на основе разницы поступления сообщений на приёмник необходимо сформировать граф сеанса. Каждый сеанс представляет из себя ориентированный взвешенный граф

$$G = \{V, R\}, \quad (2)$$

где V – множество сообщений, а R – множество пар сообщений $v, v' \in V$, а дуга (v, v') – это два сообщения с совпадающей имитовставкой, так что время поступления $t(v_{i-1}) < t(v_i)$.

Новое сообщение n_i добавляет вершину v_i в множество V , соединённую с ребром (v, v') из множества R если имитовставки n_{i-1} и n_i совпадают. Вес ребра определяем по формуле

$$r_{v_i-v_{i-1}} = t(v_i) - t(v_{i-1}). \quad (3)$$

Следующий этап – фиксация всех путей графа длиной N – количества сообщений в сеансе. В рамках описываемого алгоритма фиксация происходит при полном переборе путей.

Наличие сообщений, сформированных посторонними источниками или злоумышленником, может привести к ситуации, когда несколько сообщений подходят для продолжения одной цепочки, что делает необходимым выбор между несколькими такими цепочками. В оригинальном методе подобная ситуация вызывает ошибку определения источника сообщений. В связи с этим возникает задача определения той цепочки сообщений, которая состоит полностью из сообщения от целевого источника.

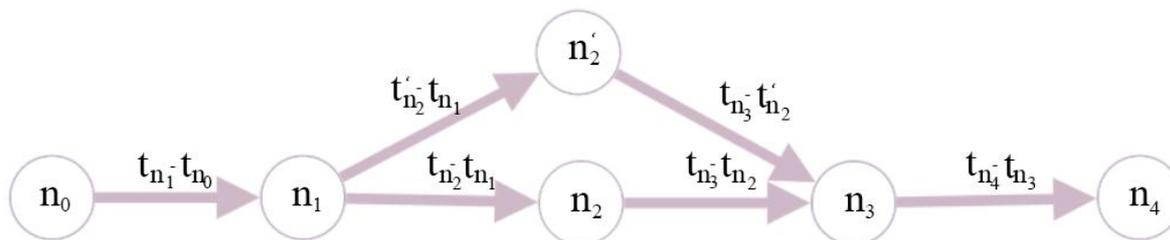


Рис. 1. Пример графа сеанса

Fig. 1. A session graph example

В работах [11–12] была определена функция распределения длительности интервалов между сообщениями от одного источника интенсивности генерации $\lambda = 0,4$ сообщений в секунду, что соответствует средним наблюдаемым значениям для сетей LoRaWAN [13]. Данный результат получен с учётом того, что передача данных осуществляет-

ся в режиме с подтверждениями успешной передачи, с механизмом повторной передачи в случае неудачи и контролем занятости канала связи передачей данных от других источников.

На рис. 1 проиллюстрирован пример сформированного графа сообщений, поступивших в течение сеанса связи. Видно, что анализ хешей привёл к формированию двух последовательностей сообщений длиной $N=5$ из-за того, что в промежуток времени t_3 и t_1 в приёмник поступило два сообщения с подходящими значениями полей основных данных и атрибутов (поля, в котором размещено значение хеша предыдущего сообщения). Для определения цепочки, состоящей только из сообщений целевого источника, можно использовать различие времени поступления отличающихся элементов и то, что интервалы между поступлениями таких сообщений подчинены разным законам распределения.

ся в режиме с подтверждениями успешной передачи, с механизмом повторной передачи в случае неудачи и контролем занятости канала связи передачей данных от других источников.

Как было сказано выше, цепочки, содержащие сообщения от неизвестного источника, формируются путём замены сообщений целевого источника в исход-

ной цепочке. Это проиллюстрировано добавлением вершин сообщений в граф, показывающий формируемую в приёмнике динамическую структуру (рис. 1), вершины v'_i , где i является целым числом, равномерно распределённым в диапазоне $[0; N-1]$. Рёбра графа, характеризующие длительность интервала между соответствующими сообщениями, которыми соединено постороннее сообщение v'_i с сообщениями целевого источника, для проведения моделирования могут быть определены по формуле

$$t(v'_i) = \text{random}(0; t(v_i) + t(v_{i+1})), \quad (4)$$

где random – функция выбора случайной величины в указанном диапазоне по закону равномерного распределения.

Это показывает случайность момента времени, в который поступило постороннее сообщение, добавленное в цепочку сообщений формируемой структуры. Соответственно:

$$t(v'_{i+1}) = (t(v_i) + t(v_{i+1})) - t(v'_i). \quad (5)$$

В рамках вышеизложенного метода на этапе принятия решения о том, что сформированная цепочка сообщений выдана целевым источником, возникает задача сравнения двух малых выборок одинакового размера, у которых все элементы совпадают кроме 1-3 подряд идущих. Математические модели формирования ошибок аутентификации показали, что для рассматриваемой модели сетевого взаимодействия вероятность возникновения последовательностей замен в цепочках снижается на порядки с увеличением числа отличаю-

щихся элементов. Это обуславливает то, что в рассматриваемой модели возникновения ошибок мы рассматривали ситуации, когда в последовательность сообщений от целевого источника встроено 1 – 3 посторонних сообщения. В результате сформированные выборки временных интервалов между сообщениями будут отличаться на соответствующее число элементов при небольшой (от 10 до 30) длине самих выборок. Такое утверждение делается на основании результатов достоверности и трудоёмкости методов аутентификации для цепочек сообщений, показывающих, что рост длины цепочек может быть критичен для вероятности корректного определения источника [14].

Поэтому стандартные характеристики, такие, как математическое ожидание или дисперсия, рассчитаны для таких выборок, не могут явиться основой для формирования решающих правил.

В работах [15, 16] исследуются характеристики моментов высоких порядков для классификации различных законов распределения, в том числе по коэффициентам асимметрии и эксцесса. Учитывая то, что сообщения от целевого источника формируются по модели типа АЛОНА, значения временных интервалов между поступлением сообщения от него подчинены некоторому закону распределения [17].

Кроме того, выводы, сделанные из исследований однородностей выборок при случайных процессах [18] и исследований аномалий значений выборки,

полученной из совокупностей выборок [19], позволяют воспользоваться значениями моментов высокого порядка для анализа и сравнения малых выборок, каковыми являются временные интервалы между получениями сообщений одной цепочки. Анализ вышеуказанных источников позволил предложить метод определения источника сообщений, в качестве анализируемых данных в котором используются такие характеристики распределения моментов высоких порядков для временных интервалов, как коэффициент асимметрии и коэффициент эксцесса.

Результаты и их обсуждение

При анализе результатов, полученных на основе описанной модели фор-

мирования временных интервалов между сообщениями, замечено, что значения коэффициентов асимметрии и эксцесса для цепочки с включёнными в её состав сообщениями посторонних источников ($n_0-n_1-n_2'-n_3-n_4$ на рис. 1), меньше в сравнении с аналогичными значениями для цепочки из сообщений целевого источника ($n_0-n_1-n_2-n_3-n_4$ на рис. 1). Проиллюстрирована тенденция уменьшения значений коэффициентов асимметрии и эксцесса для цепочек с посторонними сообщениями с помощью графика, на котором представлены точки в общей системе координат, где горизонтальная ось – коэффициент асимметрии, вертикальная – коэффициент эксцесса (рис. 2). На рисунке приведены результаты пяти экспериментов при $N = 32$.

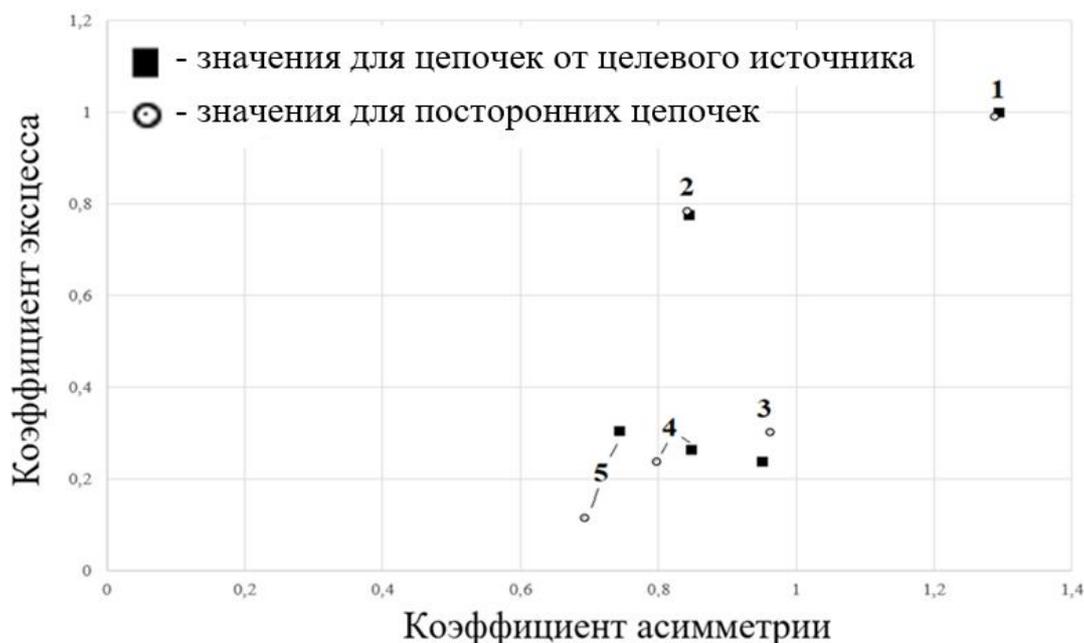


Рис. 2. Примеры значений коэффициентов эксцесса и асимметрии для цепочек, полученных от целевого источника и посторонних цепочек

Fig. 2. Examples of kurtosis and skewness coefficient values for target and unauthorized chains

Несмотря на тенденцию уменьшения значений коэффициента асимметрии и коэффициента эксцесса у посторонних цепочек (цепочек, в которых присутствуют иные, помимо сообщений целевого источника, сообщения), встречаются случаи, как например, в точке 3, когда оба коэффициента возрастают. В предлагаемом методе определения источника сообщений на основе формирования цепочек сообщений и анализа времени их поступления данная ситуация приведёт к возникновению ошибки: цепочка сообщений от целевого источника будет отвергнута, а цепочка с посторонними сообщениями будет опознана как полностью сформированная целевым источником. Для определения достоверности метода анализа времени поступления сообщений с помощью имитационной модели моделировались ситуации, когда исходный метод, основанный только на формировании цепочек сообщений [20] приводил к формированию двух и более цепочек (рис. 1). Так как формирование цепочек происходит на основе декодирования поступающего сообщения и проверки содержимого его полей, то добавление постороннего сообщения в цепочку происходит случайным образом. Для получения достоверного результата, при котором средняя доля ошибок могла бы характеризовать вероятность возникновения ошибки общее число экспериментов для каждого значения длины цепочки N равнялось 10^4 .

Различия в значениях коэффициентов позволяют сформировать различные решающие правила для выделения цепочки сообщений целевого источника из двух альтернатив. Исследовались различные сочетания мажоритарных правил: соотношения больше-меньше для значений коэффициентов асимметрии и эксцесса без учёта их абсолютных значений. Показатели успешных аутентификаций на основе имитационного моделирования представлены в табл. 1, где:

N – количество сообщений в цепочке;

K_a – процент опытов, при котором у посторонней цепочки меньше коэффициент асимметрии;

K_s – процент опытов, при котором у посторонней цепочки меньше коэффициент эксцесса;

S – процент опытов, при котором у посторонней цепочки меньше либо коэффициент асимметрии, либо коэффициент эксцесса.

В процессе моделирования, исходя из данных табл. 1, доля верных решений относительно цепочек при использовании решающего правила на основе коэффициента асимметрии была около 0,65, в зависимости от параметров модели передачи сообщений [20]. В свою очередь, использование в качестве данных, на основе которых принимается решение, значения коэффициента эксцесса давало приблизительно такую же достоверность. В то же время, если принять условием уменьшение хотя бы одного из двух коэффициентов, то вероятность верного определения цепочки сообщений целевого источника достигает 0,8.

Таблица 1. Результаты численного моделирования**Table 1.** Results of numerical simulation

№п/п	N	K_A	K_{Σ}	S	№ п/п	N	K_A	K_{Σ}	S
1	5	63	61	81	7	40	68	66	80
2	10	66	66	82	8	45	65	63	83
3	15	72	70	79	9	50	61	68	81
4	20	65	63	81	10	55	69	60	82
5	25	54	72	82	11	60	73	73	84
6	30	60	69	84	12	64	61	74	85

Таким образом, максимальный процент успешного определения цепочки сообщений от целевого источника в рассматриваемом методе достигается при использовании правила, формализованного как:

$$\text{auth} = (K_A > K'_A) \text{ or } (K_{\Sigma} > K'_{\Sigma}), \quad (6)$$

где K_A и K_{Σ} – коэффициенты асимметрии и эксцесса, рассчитанные для цепочки сообщений, которую, согласно обсуждаемому методу, определяем как цепочку сообщений целевого источника, а K'_A и K'_{Σ} – коэффициенты асимметрии и эксцесса, рассчитанные для последовательности сообщений, определяемой как последовательность, включающая сообщения нецелевого источника. Иными словами, цепочкой сообщений целевого источника признаётся цепочка, у которой больше рассчитанный для неё либо коэффициент асимметрии, либо коэффициент эксцесса.

Таким образом метод определения источника сообщений на основе анализа времени их поступления может быть представлен следующими этапами:

1) буферизация сообщений и фиксация времени поступления каждого из них на приёмнике;

2) формирование на основании анализа кодов аутентификации сообщений и временных интервалов сообщений взвешенного графа (1);

3) в случае, когда в графе сеанса присутствует более чем одна цепочка требуемой длины, находим коэффициенты эксцесса и асимметрии из выборок, представленных весами дуг соответствующих цепочек;

4) считать ту цепочку сообщений от целевого источника, которая удовлетворяет условию (6) минимальности коэффициентов эксцесса или асимметрии.

Результаты численного моделирования представлены на рис. 3, на котором приведены зависимости вероятности ошибки для метода выделения атрибутов при обработке цепочки сообщений для одинаковых значений длин $H = 7$ поля атрибутивных данных (параметр, влияющий на достоверность исходного метода определения источника сообщений) с применением анализа времени поступления сообщений и

без него при $N = 10$ (данные по оси ординат представлены в логарифмическом масштабе).

Из рис. 3 видно, что использование анализа времени поступления сообщений даёт фиксированное снижение вероятности ошибки в сравнении с методами, определяющими источник цепочки со-

общений только на основании построения цепочек сообщений, кодированных в режиме сцепления блоков. При этом эффект от анализа времени поступления сообщений не зависит от числа источников, формирующих сообщения для рассматриваемого приёмника и параметров кодирования сообщений.

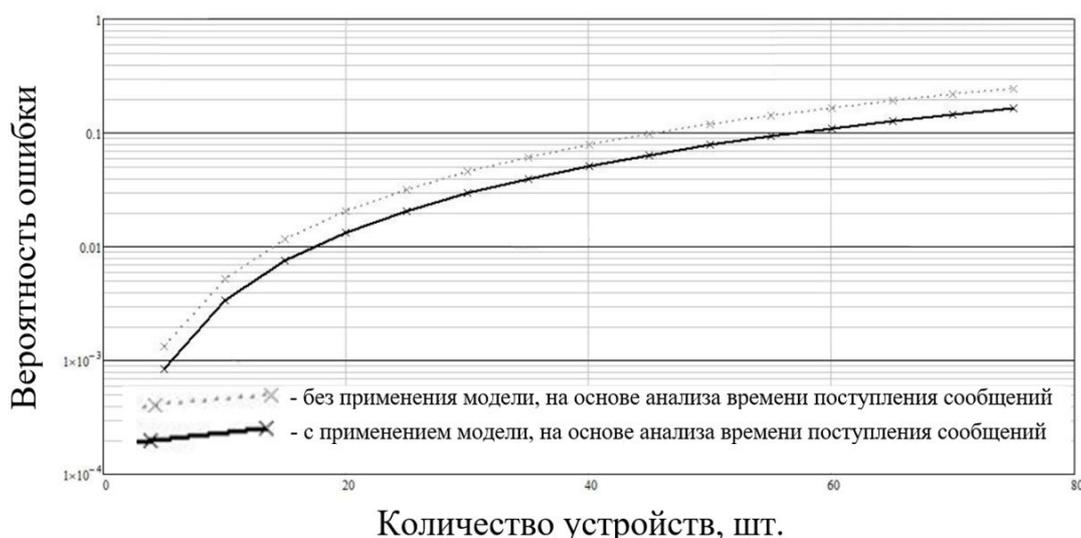


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибки с применением предложенной модели от числа устройств при одинаковой длине фрагментированного сообщения n и длине поля атрибутивных данных

Fig. 3. Dependence of the error probability using the proposed model on the number of devices for the same length of the fragmented message n and the length of the attribute data field

Наиболее близкий к описанному метод представлен в работе [21]. В основе метода определения истинной цепочки сообщений, аналогично, лежит анализ временных задержек поступления сообщений на приёмник. Решающее правило формируется на основе подсчёта площади трапеции, построенной из линий, которые ограничивают показатели сравниваемых временных рядов на графике зависимости временных

задержек от длины цепочки. Ошибка метода фиксировалась, если площадь, выстроенная по описанным формулам, для массива временных промежутков доставки сообщений на приёмник больше или равна альтернативному массиву временных задержек, в котором один элемент временной задержки отличается.

На рис. 4 проиллюстрированы зависимости возникновения ошибок аутентификации от длины анализируемого

числового ряда временных задержек с использованием числовых характеристик моментов высоких порядков, описанная в данной работе, и с использованием подсчёта площади трапеции для массива временных задержек. Из гра-

фика прослеживается, что при больших значениях длины цепочки (начиная от $N = 30$) показатели методов примерно равные, однако при низких значениях предложенный метод имеет преимущество в 5 - 15 %, в зависимости от N .

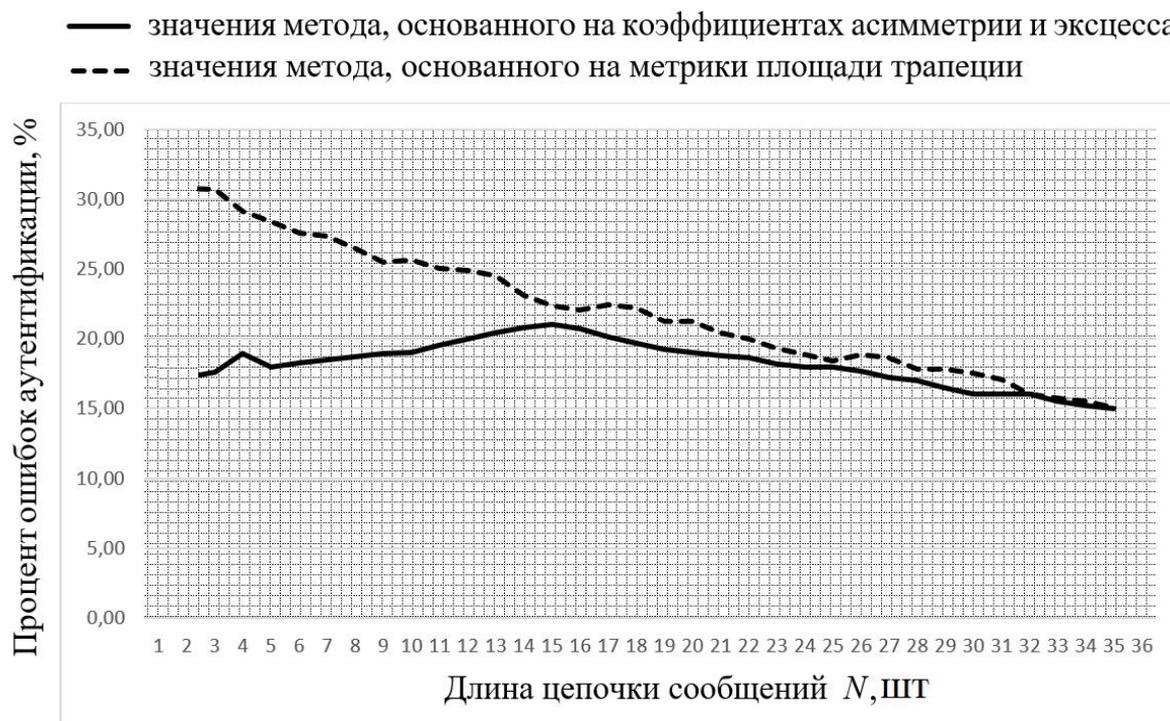


Рис. 4. Зависимость вероятности ошибки аутентификации от длины цепочки сообщений для различных методов определения источника сообщений

Fig. 4. Dependence on the probability of authentication failure from message chains for different methods of discovering message sources

Связано это с тем, что при отсутствии длительных задержек график массива становится более ровным, лишённым значительных отклонений времени доставки от тренда, на фоне чего пакет постороннего источника, время доставки которого распределено в широком диапазоне, даёт резкое увеличение значения метрики площади. В свою очередь, предложенный в данной работе метод, а именно коэффициенты

асимметрии и эксцесса дают отклонение в цепочках с посторонними сообщениями, при намного меньшем значении длины самой цепочки значений задержек, а значит представляется возможность использовать метод в информационных системах с низкой пропускной способностью.

Таким образом, предложенный в данной работе метод анализа метаинформации о поступающих в приёмник

сообщениях позволяет повысить надёжность аутентификации источника данных. Однако в реальных информационных системах возможны ситуации, когда ложные сообщения могут формировать побочные цепочки большей длины. В таком случае, одним из возможных продолжений данного исследования является определение вероятности ложных сообщений на этапе формирования цепочки сообщений, и принятие решения об отклонении аутентификации на этапе обработки только части цепочки сообщения.

Выводы

В данной работе рассмотрена возможность использования числовых характеристик распределения, а именно коэффициента асимметрии и коэффи-

циента эксцесса для исправления ошибок аутентификации при сетевом взаимодействии на основе метаданных. В качестве метаданных используются показатели времени поступления сообщения в приёмник. Применен метод оценки выборок при использовании характеристик моментов высоких порядков (таких как коэффициент асимметрии и коэффициент эксцесса), которая является действенным средством анализа выборок небольшого размера. Показано, что сочетание режима сцепления блоков для аутентификации с использованием анализа времени поступления в сетевой модели типа АЛОНА позволяет снизить вероятность ошибки определения источника сообщений по сравнению с методами, использующими только режим сцепления блоков.

Список литературы

1. Информационная безопасность предприятия / А. В. Бабаш, Е. К. Баранова, Д. Ларин, Н.В. Гришина. М.: Форум, 2018. 118 с.
2. Буренин А.Н., Легков К.Е. Основные проблемы безопасности подсистем обеспечения единым временем элементов систем управления сложными организационно-техническими объектами // Т-сomm: телекоммуникации и транспорт. 2019. С. 48.
3. Gligor V.D., Donescu P. Fast encryption and authentication: XCBC encryption and XECB authentication modes // Manuscript, August 2002. P. 92–108.
4. Установление доверительного канала обмена данными между источником и приёмником информации с помощью модифицированного метода одноразовых паролей / М.О. Таныгин, Х.Я. Алшаиа, В.А. Алтухова, А.Л. Марухленко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. № 4(29). С. 63-71.
5. Колегов Д.Н. Общий метод аутентификации HTTP-сообщений в веб-приложениях на основе хеш-функций // Прикладная дискретная математика. Приложение. 2014. № 7. С. 85-89.

6. Вариант разграничения доступа к информационным ресурсам на основе неявной аутентификации / А.Л. Марухленко, А.В. Плугатарев, М.О. Таныгин, Л.О. Марухленко, М.Ю. Шашков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020;24(2):108-121. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-108-121>

7. Panagiotis Papadimitratos, Zygmunt J. Haas Secure message transmission in mobile ad hoc networks // Ad Hoc Networks. 2003. №1. P. 193–209

8. Shi X., D. Xiao A reversible watermarking authentication scheme for wireless sensor networks // Information Sciences. 2013. Vol. 240. P. 173-183. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.03.031>

9. Анализ системы контроля целостности цепочек информационных блоков на основе хэшей / М. О. Таныгин, М.С. Брусов, Е.О. Ефремова, Ю.В. Сухорукова // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: материалы III Всероссийской научно-практической конференции. Курск, 2019. С.373 – 378.

10. Гузеев А.В. Формирование распределения вероятностей появления отдельных сообщений источника при статистическом кодировании // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2010. Т. 4. № 6. С. 12-16.

11. Mytsko E.A., Malchukov A.N., Ivanov S.D. Research of algorithms for calculating the CRC8 checksum in microprocessor systems with a shortage of resources // Devices and systems. Management, control, diagnostics. 2018. No. 6. P. 22-29.

12. Bankov D., Khorov E., Lyakhov A. On the Limits of LoRaWAN Channel Access. Engineering and Telecommunication (EnT), 2016 International Conference on IEEE. 2016. Pp. 10–14

13. Iantado Ferran, Vilajosana Xavier, Tuset Pere et al. Understanding the Limits of LoRaWAN // IEEE Communications Magazine. 2017.

14. Tanygin M.O., Efremov M.A., Tanygina E.A. The Computational Complexity of the Algorithm for Identifying the Source of Data Transmitted by Limited Length Blocks // Proceedings - 2021 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2021, 2021, pp. 298–302.

15. 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.

16. Жукова Г.Н. Идентификация вероятностного распределения по коэффициентам асимметрии и эксцесса // Автоматизация. Современные технологии. 2016. №5. С. 26-33.

17. Vangelista Lorenzo. Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation // IEEE Signal Processing Letters. 2017. Vol. 24, no. 12. Pp. 1818–1821.

18. Urazbakhtin A.I., Urazbakhtin I.G. Algorithm for checking the homogeneity of the sample and its representativeness to the random process under study // Infocommunication technologies. 2006. V. 4. No. 3. S. 10-14.

19. Tatyana I. Lapina, Ildus G. Urazbahtin Time series forecasting based on data normalization methods // Proceedings Volume 6277, Optical Technologies for Telecommunications 2005; 62770C (2006).

20. Jorke Pascal, Bocker Stefan, Liedmann Florian, Wietfeld Christian. Urban channel models for smart city IoT-networks based on empirical measurements of LoRa-links at 433 and 868 MHz // 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC) / IEEE. 2017. Pp. 1–6.

21. Таныгин М. О., Хемраев Д., Казакова О. В. Повышение достоверности определения источника фрагментированных сообщений за счёт использования методов анализа времени поступления отдельных фрагментов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 4. С. 46–60.

References

1. Babash A. V., Baranova E. K., Larin D., Grishina N.V. *Informatsionnaya bezopasnost' predpriyatiya* [Information security of the enterprise]. Moscow, Forum Publ., 2018. 118 p.

2. Burenin A.N., Legkov K.E. Osnovnye problemy bezopasnosti podsystem obespecheniya edinyim vremenem elementov sistem upravleniya slozhnyimi organizatsionno-tekhnicheskimi ob"ektami [The main problems of security of subsystems for ensuring the elements of control systems for complex organizational and technical objects with a single time]. *T-comm: telekommunikatsii i transport = T-comm: Telecommunications and Transport*, 2019, 48 p.

3. Gligor V.D., Donescu P. Fast encryption and authentication: XCBC encryption and XECB authentication modes. *Manuscript*, August 2002, pp. 92–108.

4. Tanygin M.O., Alshaia Kh.Ya., Altukhova V.A., Marukhlenko A.L. Ustanovlenie doveritel'nogo kanala obmena dannymi mezhdru istochnikom i priemnikom informatsii s pomoshch'yu modifitsirovannogo metoda odnorazovykh parolei [Establishment of a trusted data exchange channel between the source and receiver of information using a modified method of one-time passwords]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie =*

Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering, 2018, no. 4 (29), pp. 63-71.

5. Kolegov D.N. Obshchii metod autentifikatsii HTTP-soobshchenii v veb-prilozheniyakh na osnove khesh-funktsii [A general method for authenticating HTTP messages in web applications based on hash functions]. *Prikladnaya diskretnaya matematika. Prilozhenie = Applied Discrete Mathematics, Appendix*, 2014, no. 7, pp. 85-89.

6. Marukhlenko A.L., Plugatarev A.V., Tanygin M.O., Marukhlenko L.O., Shashkov M.Yu. Variant razgranicheniya dostupa k informatsionnym resursam na osnove neyavnoi autentifikatsii [Option to restrict access to information resources based on implicit authentication]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020;24(2):108-121. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-108-121>.

7. Panagiotis Papadimitratos, Zygmunt J. Haas Secure message transmission in mobile ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 2003, no. 1, pp. 193–209.

8. Shi X., D. Xiao A reversible watermarking authentication scheme for wireless sensor networks. *Information Sciences*, 2013, vol. 240, pp. 173-183. DOI:10.1016/j.ins.2013.03.031

9. Tanygin M. O., Brusov M.S., Efremova E.O., Sukhorukova Yu.V. [Analysis of the system for monitoring the integrity of chains of information blocks based on hashes]. *Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti reshe-niya: Materialy III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Infocommunications and space technologies: status, problems and solutions. Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kursk, 2019, pp. 373 - 378 (In Russ.).

10. Guzeev A.V. Formirovanie raspredeleniya veroyatnostei poyavleniya otdel'nykh soobshchenii istochnika pri statisticheskom kodirovanii [Formation of the probability distribution of the occurrence of individual source messages during statistical coding]. *T-Comm: Telecommunications and transport*, 2010, vol. 4, no. 6, pp. 12-16.

11. Mytsko E.A., Malchukov A.N., Ivanov S.D. Research of algorithms for calculating the CRC8 checksum in microprocessor systems with a shortage of resources. *Devices and systems. Management, control, diagnostics*, 2018, no. 6, pp. 22-29.

12. Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey. On the Limits of LoRaWAN Channel Access. Engineering and Telecommunication (EnT). *2016 International Conference on IEEE*, 2016, pp. 10–14.

13. Iantado Ferran, Vilajosana Xavier, Tuset Pere et al. Understanding the Limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine*. 2017.

14. Tanygin M.O., Efremov M.A., Tanygina E.A. The Computational Complexity of the Algorithm for Identifying the Source of Data Transmitted by Limited Length Blocks. *Pro-*

15. Zhukova G.N. Karta koeffitsientov asimmetrii i ekstsessa v prepodavanii teorii veroyatnostei i matematicheskoi statistiki [Map of skewness and kurtosis coefficients in teaching probability theory and mathematical statistics]. *Nauchno-metodicheskii elektronnyi zhurnal "Kontsept" = Scientific and methodological electronic journal Concept*, 2015, no. 8, pp. 56-60.

16. Zhukova G.N. Identifikatsiya raspredeleniya po koeffitsientam asimmetrii i ekstsessa [Identification of the distribution by the coefficients of skewness and kurtosis]. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii = Automation. Modern technologies*. 2016, no.5, pp. 26-33.

17. Vangelista Lorenzo. Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation. *IEEE Signal Processing Letters*, 2017, vol. 24, no. 12, pp. 1818–1821.

18. Urazbakhtin A.I., Urazbakhtin I.G. Algorithm for checking the homogeneity of the sample and its representativeness to the random process under study. *Infocommunication technologies*, 2006, vol. 4, no. 3, pp. 10-14.

19. Tatyana I. Lapina, Ildus G. Urazbahtin Time series forecasting based on data normalization methods. *Proceedings Volume 6277, Optical Technologies for Telecommunications*, 2005; 62770C (2006).

20. Jorke Pascal, Bocker Stefan, Liedmann Florian, Wietfeld Christian. Urban channel models for smart city IoT-networks based on empirical measurements of LoRa-links at 433 and 868 MHz // *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC) / IEEE*. 2017. Pp. 1–6.

21. Tanygin M. O., Hemrayev D., Kazakova O. V. Povyshenie dostovernosti opredeleniya istochnika fragmentirovannykh soobshchenii za schet ispol'zovaniya metodov analiza vremeni postupleniya otdel'nykh fragmentov [Increasing the Reliability of Determining the Source of Fragmented Messages by Using Methods for Analyzing the time of Receipt of Individual Fragments]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2021; 11(4): 46–60.

Информация об авторах / Information about the Authors

Таныгин Максим Олегович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tanygin@yandex.ru

Maxim O. Tanygin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Fundamental and Applied Computer Science Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: tanygin@yandex.ru

Плугатарев Алексей Владимирович, аспирант кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: aplugatarev@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8549-4382>

Aleksey V. Plugatarev, Post-Graduate Student of Fundamental and Applied Computer Science Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: aplugatarev@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8549-4382>

Егоров Сергей Иванович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sie58@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5859-1024>

Sergey I. Egorov, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of Computer Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sie58@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5859-1024>

Локтионов Аскольд Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: loapa@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1108-4185>, Researcher ID: P-5434-2015

Askold P. Loktionov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Power Supply, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: loapa@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1108-4185>, Researcher ID: P-5434-2015

Балансировка нагрузки данных в распределенной сети через прокси-сервер Nginx

К. И. Никишин¹ ✉

¹ Пензенский государственный университет
ул. Красная, д. 40, г. Пенза 440026, Российская Федерация

✉ e-mail: nkipnz@mail.ru

Резюме

Цель исследования: исследование программного способа балансировки данных в распределенной сети через прокси-сервер Nginx.

Методы. Балансировка нагрузки данных в компьютерной сети является важным параметром сети. Из-за балансировки нагрузки в сети может уменьшаться или увеличиваться задержка передачи, разброс от среднего значения джиттера. Таким образом, балансировка нагрузки в сети влияет на временные характеристики и пропускную способность сети. Управление и оптимизацию балансировки нагрузки можно осуществлять как программным, так и аппаратным способами. В статье уделяется внимание балансировке нагрузки данных на прикладном уровне приложений. Кратко рассмотрена аппаратная балансировка нагрузки, которая решается в рамках непосредственно сетевого оборудования, к примеру, в коммутаторах. Это решается диспетчером управления очередями в коммутаторе Ethernet, который управляет полосой пропускания и очередями. Описаны циклические алгоритмы, а также алгоритм с временной селекцией кадров в диспетчерах коммутатора, которые реализуют эффективную аппаратную балансировку нагрузки. Рассмотрена программная балансировка нагрузки данных в сети. В качестве программной балансировки нагрузки использовался веб-сервер и обратный прокси-сервер Nginx, на сервере было запущено 3 Docker контейнера, сделанного на основе Asp.net приложения, запущенных на разных окружениях.

Результаты. Произведена настройка, конфигурация сети и использовался циклический алгоритм балансировки нагрузки RR в сервере Nginx. Было проведено исследование сети с разным количеством окружений в сети, веб-серверов, запросов данных. Циклический алгоритм балансировки нагрузки в Nginx является более эффективным по сравнению со случайным алгоритмом, это было показано в ходе экспериментов.

Заключение. Были рассмотрены и исследованы аппаратные и программные алгоритмы балансировки нагрузки в распределенной сети. Циклические алгоритмы балансировки данных позволили повысить пропускную способность сети, ее эффективность и быстродействие.

Ключевые слова: балансировка нагрузки; распределенные сети; Ethernet; задержка передачи; циклические алгоритмы балансировки; прокси-сервер Nginx; Docker; сети Петри; CPN Tools.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Никишин К. И. Балансировка нагрузки данных в распределенной сети через прокси-сервер Nginx // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(3): 98-111. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-98-111>.

Поступила в редакцию 22.06.2022

Подписана в печать 20.07.2022

Опубликована 30.09.2022

Load Balancer of Data in a Distributed Network via Nginx Proxy Server

Kirill I. Nikishin ¹ ✉

¹ Penza State University
40 Krasnaya str., Penza 440026, Russian Federation

✉ e-mail: nkipnz@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Is investigation of a software method for balancing data in a distributed network via an Nginx proxy server.

Methods. In a computer network load balancer of data is an important network parameter. Due to load balancer in the network, the transmission delay may decrease or increase, the spread from the average jitter value. Thus, load balancer in the network affects the time characteristics and network bandwidth. Load balancer can be managed and optimized in both software and hardware ways. The article focuses on load balancer of data at the application level of applications. Hardware load balancer, which is solved within the framework of network equipment itself, for example, in switches, is briefly considered. This is handled by the queue manager in the Ethernet switch, which manages the bandwidth and queues. Cyclic algorithms are described, as well as an algorithm with time selection of frames in dispatcher of switch that implement effective hardware load balancer. Software load balancer of data in the network is considered. A web server and an Nginx reverse proxy server were used as software load balancer, 3 Docker containers based on Asp.net applications running on different environments.

Results. The network was configured and the cyclic load balancer algorithm was used in the Nginx server. A research of a network with a different number of environments in the network, web servers, data requests was conducted. The cyclic load balancer of data in Nginx is more efficient than the random algorithm, this has been shown during experiments.

Conclusion. Hardware and software load balancer algorithms in a distributed network were considered and investigated. Cyclic load balancer of data has made it possible to increase the network bandwidth, its efficiency and performance.

Keywords: load balancer; distributed networks; Ethernet; transmission delay; cyclic balancing algorithms; Nginx proxy server; Docker; Petri Nets; CPN Tools.

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

For citation: Nikishin K.I. Load Balancer of Data in a Distributed Network via Nginx Proxy Server. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(3): 98-111 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-98-111>.

Received 22.06.2022

Accepted 20.07.2022

Published 30.09.2022

Введение

В настоящее время распределенные сети нашли широкое применение и применяются различных сферах дея-

тельности. Распределенные сети находят применение в промышленности, так и у конечного пользователя. Основным достоинством распределенных сетей яв-

ляется отказоустойчивость и создание резервных копий данных, системы в случае ошибок.

Распределенные сети являются новой парадигмой в случае с классическими компьютерными сетями, основанными на Ethernet [1] и понятии «качества обслуживания» (Quality of Service QoS) согласно формату IEEE 802.1 [2-3]. К распределенным компьютерным сетям можно отнести программно-конфигурируемые сети (ПКС) [4-8], облачное хранилище и сеть [9], технологию Time-Triggered Ethernet [10-12].

Критически важным параметром в компьютерных сетях является задержка передачи данных, разброс на выходе коммутатора среднего значения задержки (джиттер). Согласно стандарту семиуровневой модели OSI верхним уровнем является прикладной, передача данных в сети Ethernet – на сетевом и канальном уровне.

Многие исследования в области уменьшения и прогнозирования задержек данных в компьютерной сети основываются в первую очередь на этих уровнях модели OSI. Одним из вариантов уменьшения задержки является балансировка нагрузки данных, трафика.

В статье уделяется внимание балансировке нагрузки данных на прикладном уровне, поскольку прикладной уровень играет существенную роль в конфигурировании и управлении распределенной сети.

К примеру, в ПКС выделяют три уровня управления сетью, и важным уровнем является уровень приложений [13], поскольку администратор сети распределяет оптимальным образом маршрут данных, принятие решения в случае исключительных, ошибочных ситуаций, когда контроллер ПКС не может самостоятельно принять данное решение. Частым способом обмена информацией в распределенной сети является JSON.

Материалы и методы

Балансировка нагрузки данных в компьютерной сети является важным параметром сети. Управление и оптимизацию балансировки нагрузки можно осуществлять как программным, так и аппаратным способами. На рис. 1 представлена обобщенная передача данных по сети Интернет от клиента к серверу и с учетом балансировки нагрузки.

Аппаратная балансировка нагрузки может решаться в рамках сетевого и телекоммуникационного оборудования (коммутаторы, маршрутизаторы). В коммутаторах основным элементом управления является диспетчер очередей коммутатора.

Балансировка нагрузки в коммутаторе решается с помощью управления полосой пропускания и управления очередями. Как раз таковым является диспетчер управления очередями в коммутаторе Ethernet.



Рис. 1. Схема передача данных с учетом балансировки нагрузки в сети

Fig. 1. The scheme of data transmission using load balancer in the network

Исследования в этой области основываются на создании и разработке эффективных алгоритмов диспетчеризации с учетом многокритериальных параметров управления диспетчерами коммутатора. К наиболее эффективным алгоритмам относятся различные циклические алгоритмы (Round Robin RR), взвешенные справедливые (Weighted Fair Queuing WFQ) [14-15].

Циклические алгоритмы делятся на взвешенный циклический алгоритм (Weighted Round Robin WRR) и дефицитный циклический алгоритм (Deficit Round Robin DRR). К новому эффективному алгоритму относится алгоритм с временной селекцией кадров (Time Selection Service TSS), в статьях [16-17] описано подробное описание алгоритма, моделирование и показатели его эффективности при управлении очередями. Основное отличие учитываются время ожидания кадров в очередях и

ограничение времени обслуживания очередей, что в свою очередь приводит к уменьшению разброса среднего значения джиттера в сети.

Эффективным средством исследования компьютерных сетей является математический аппарат сетей Петри в пакете CPN Tools [18-19]. В данном пакете можно исследовать не только функционирование компьютерной сети, а также временные задержки, джиттер, вести и учитывать статистику, создавать кортежи с помощью различных структур и цветов, декомпозировать модель на более мелкие модели, программировать на языке CPN ML, верифицировать модели на тупиковые переходы, вычислять пространства состояний [20-21]. Сеть Петри, моделирующая алгоритм с учетом времени ожидания кадров (диспетчер очередей TSS), представлена на рис. 2.

Перейдем к рассмотрению программной балансировки нагрузки данных в сети. В качестве программной балансировки нагрузки (load balancer) используется веб сервер и обратный прокси-сервер Nginx, на сервере запущено 3 Docker контейнера, сделанного на основе Asp.net приложения, запущенных на разных окружениях.

Чтобы веб-сервер смог распределять нагрузку необходимо создать его

конфигурацию и находится `*/nginx/conf/nginx.conf`. Создается группа веб-серверов, для того чтобы по ним распределять запросы сервером. Для тега `upstreams` задаются имя `servers` и добавляются адреса веб-серверов.

```

upstream servers{
    server localhost: 8001;
    server localhost: 8002;
    server localhost: 8003;
}
    
```

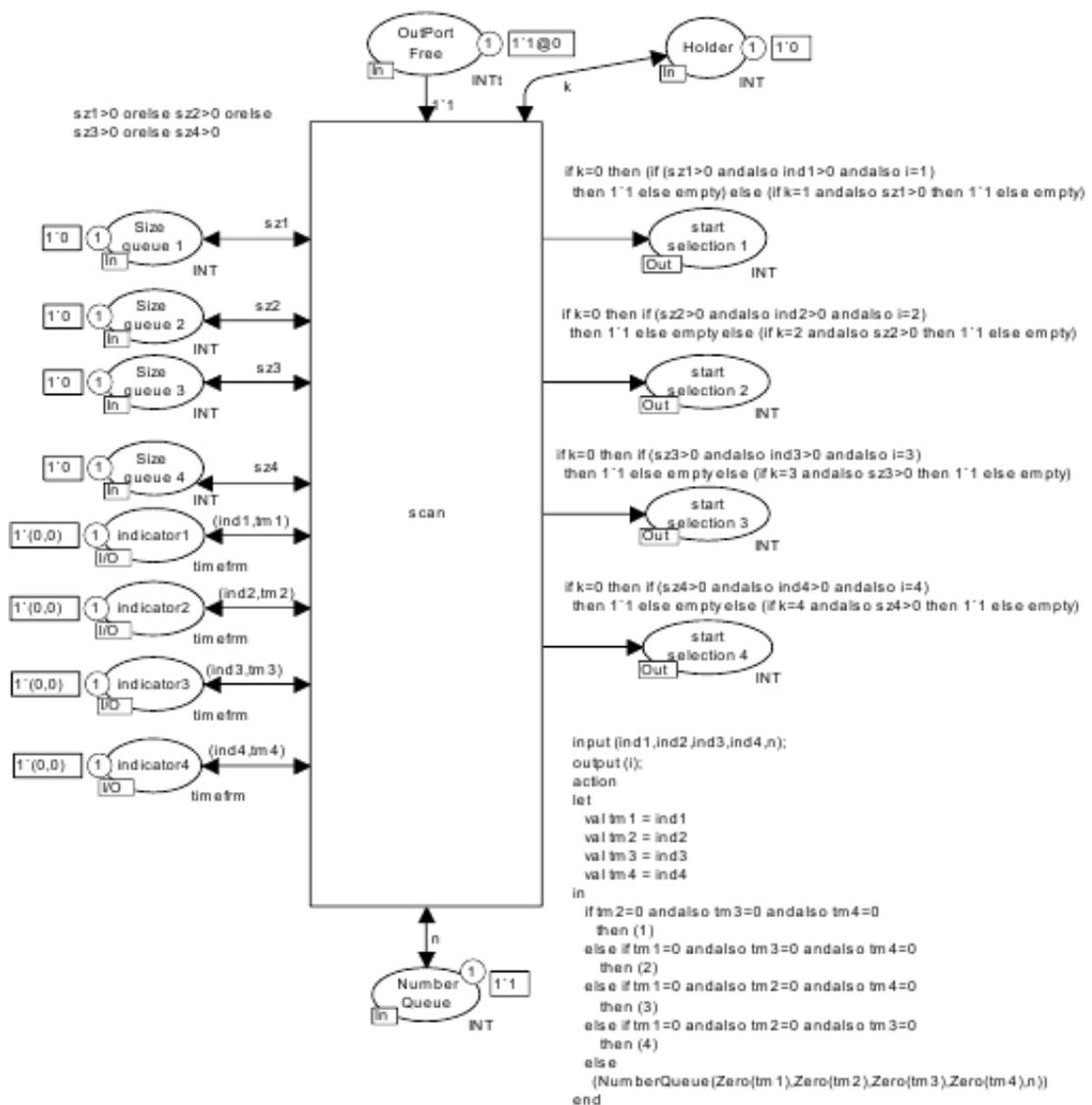


Рис. 2. Сеть Петри диспетчера очередей коммутатора по алгоритму TSS

Fig. 2. The Petri network of dispatcher of switch using the TSS algorithm

Затем необходимо в настройках виртуального домена создать прокси-запросы на созданный ранее upstream. Настройка выглядит следующим образом:

```
server{
    listen 8888;
    location / {
        proxy_pass http://servers;
        proxy_set_header Host $host;
    }
}
```

Параметр `proxy_pass` указывает, что все запросы должны переводиться на upstream servers, а он, в свою очередь, будет перенаправлять запросы на указанные сервера. Параметр `proxy_set_header` продублирует заголовок `Host` пришедший на веб-сервер в Docker. При настройке серверов можно указывать опции: наличие резервного сервера `backup`, временная приостановка запросов `down`, распределение весов и их учете при прохождении прокси-запроса `weight`.

```
upstream servers{
    server localhost:8001 weight
= 100 max_fails=2 fail_timeout =90s;
    server localhost:8002 weight
= 200 max_conns=1000;
    server localhost:8003 backup;
    server localhost:8003 down;
}
```

Nginx считает сервер недоступным после одной неудачной попытки отправки на него запроса и в течение 10 секунд не работает с ним. Балансировка нагрузки регулируется с помощью следующих параметров: количество неудачных попыток, после которых сервер считается

недоступным, `max_fails` и время недоступности сервера `fail_timeout`.

В сервере Nginx могут использоваться следующие алгоритмы балансировки нагрузки: циклический (RR), на основе хэш-функций, случайный. В статье рассматривается взвешенный циклический алгоритм, таким образом, с учетом распределения весов обслуживаются и управляются очереди. Файл конфигурации веб-сервера представлен ниже:

```
events {}
http{
    upstream servers{

        server localhost:8001 weight = 100
max_fails=2 fail_timeout =90s;
        server localhost:8002 weight =
200 max_conns=1000;
        server localhost:8003 backup;
        server localhost:8003 down;
    }
    server{
        listen 8888;
        location / {
            proxy_pass http://servers;
            proxy_set_header Host $host;
        }
    }
}
```

В качестве утилиты для отправки HTTP запросов используется Postman. В качестве серверов используется WEB API решение на фреймворке Asp.net. Шесть серверов запущены на условно разных окружениях (`Environment_1`, `Environment_2`, `Environment_3`). Для исследования и распределения балансировки нагрузки было разработано приложение, предназначенное для анализа получения погоды на ближайшие 5 дней.

На запрос /Api/GetWeather методом GET приходит ответ из ResponseModel: environment – имя окружения, на котором запущен сервис типа string, lead_time – время длительности получения погоды, weather – перечисление дней и погоды на каждый день типа коллекции элементов типа WeatherForecast: date – дата типа datetime, temperatureC – средняя температура за день в градусах Цельсия, temperatureF – средняя температура за день в градусах Фаренгейта, summary – общая характеристика погоды на день.

Для развертывания приложения используется Docker. Команда создания образа приложения - docker build --pull -t apiweater:1.0.

Команды создания контейнеров на соответствующих портах и разных переменных окружения ASPNETCORE_ENVIRONMENT:

```
docker run --name Environment1 --env "ASPNETCORE_ENVIRONMENT=Environment1" -it -p 8001:80 apiweater:1.0
docker run --name Environment2 --env "ASPNETCORE_ENVIRONMENT=Environment2" -it -p 8002:80 apiweater:1.0
docker run --name Environment3 --env "ASPNETCORE_ENVIRONMENT=Environment3" -it -p 8003:80 apiweater:1.0
```

Для запуска серверов также можно использовать стандартную утилиту Windows – PowerShell. Необходимо перейти в директорию с приложением и выполним команду: dotnet run --launch-profile "имя окружения для запуска". Запуск окружения Environment_1 представлен на рис. 3.

Запуск веб-сервера с созданной конфигурацией представлен на рис. 4.

```
PS C:\Learn\VebApi\VebApi> dotnet run --launch-profile "env1"
Сборка:
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[14]
Now listening on: https://localhost:81
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[0]
Application started. Press Ctrl+C to shut down.
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[0]
Hosting environment: Environment1
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[0]
Content root path: C:\Learn\VebApi\VebApi\
```

Рис. 3. Запуск окружения Environment_1

Fig. 3. Run of Environment_1

```
PS C:\nginx-1.21.6> tasklist /fi "imagename eq nginx.exe"
Имя образа          PID Имя сессии          № сеанса          Память
-----
nginx.exe            18112 Console              1          11 396 КБ
nginx.exe            15488 Console              1          11 620 КБ
PS C:\nginx-1.21.6>
```

Рис. 4. Запуск веб-сервера

Fig. 4. Run of web server

Таким образом, запущено три идентичных приложения на различных окружениях.

Результаты и их обсуждение

После запуска веб-сервера на порту 8888 и приложений на портах 8001, 8002, 8003 отправляются 10 запросов по адресу: `http://localhost:8888/Api/GetWeather`. Каждый запрос будет проходить через прокси на разные запущенные сервера согласно циклическому алгоритму RR с разным временем обработки запроса на сервере.

Формат ответа на запрос приходит в JSON формате и вычисляется время обработки на сервере в зависимости от окружения, доступности самого веб-сервера. Например, ответ на запрос для окружения 2 представлен ниже и на рис. 5:

```
{
  "environment": "Environment_2",
  "lead_time": 4.2125794,
  "weather": [
    {
      "date": "2022-06-12T00:17:10.6409921+00:00",
      "temperatureC": 54,
      "temperatureF": 129,
      "summary": "Scorching"
    },
    {
      "date": "2022-06-14T00:17:10.6409986+00:00",
      "temperatureC": -15,
      "temperatureF": 6,
      "summary": "Hot"
    },
    {
      "date": "2022-06-16T00:17:10.640999+00:00",
      "temperatureC": 42,
      "temperatureF": 107,
      "summary": "Warm"
    },
    {
      "date": "2022-06-13T03:30:36.9829789+03:00",
      "temperatureC": 24,
      "temperatureF": 75,
      "summary": "Chilly"
    }
  ]
}
```



Рис. 5. Ответ на один из запросов для окружения 2

Fig. 5. Response to one of the requests for environment 2

Для тестирования производилось включение веб-серверов для проверки работоспособности сети и корректной отправки запросов согласно циклическому алгоритму RR между рабочими веб-серверами и для необходимости запаса веб-сервера, указанного в конфигурации сети. На рис. 6 представлено

одновременное включение веб-серверов 1-2, вычисление балансировки нагрузки с учетом поступивших к ним запросов.

Циклический алгоритм RR отправляет запросы по очереди на каждый доступный веб-сервер. При поступлении запросов 4-6 был недоступен веб-сервер 1, при поступлении запросов 7-8 были

недоступны веб-сервера 2-3. Таким образом, Nginx способен прокси-запросы на разные сервера, распределяя нагрузку между всеми доступными в данный момент серверами.

Был проведен сравнительный анализ балансировки нагрузки данных на распределенную сеть с учетом различных алгоритмов обработки. На рис. 7 пред-

ставлена диаграмма обработки запросов, можно увидеть, что циклический алгоритм балансировки нагрузки обладает большей эффективностью и уменьшению среднего времени обработки запроса на стороне сервера, повышается быстродействие в сети в среднем на 25-28% в отличие от алгоритма случайного характера в балансировке нагрузки.

```

PS C:\Users\sw> cd C:\Learn\
PS C:\Learn> cd C:\Learn\
PS C:\Learn> cd .\VebApi\
PS C:\Learn\VebApi> cd .\VebApi\
PS C:\Learn\VebApi\VebApi> dotnet run --launch-profile "env2"
Сборка:
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[14]
      Now listening on: https://localhost:82
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[0]
      Application started. Press Ctrl+C to shut down.
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[0]
      Hosting environment: Environment2
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[0]
      Content root path: C:\Learn\VebApi\VebApi\
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[0]
      Application is shutting down...
PS C:\Learn\VebApi\VebApi> dotnet run --launch-profile "env2"
Сборка:
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[14]
      Now listening on: https://localhost:82
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[0]
      Application started. Press Ctrl+C to shut down.
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[0]
      Hosting environment: Environment2
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[0]
      Content root path: C:\Learn\VebApi\VebApi\

PS C:\Users\sw> cd C:\Learn\
PS C:\Learn> cd .\VebApi\
PS C:\Learn\VebApi> cd .\VebApi\
PS C:\Learn\VebApi\VebApi> dotnet run --launch-profile "env1"
Сборка:
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[14]
      Now listening on: https://localhost:81
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[0]
      Application started. Press Ctrl+C to shut down.
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[0]
      Hosting environment: Environment1
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[0]
      Content root path: C:\Learn\VebApi\VebApi\
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[0]
      Application is shutting down...
PS C:\Learn\VebApi\VebApi> dotnet run --launch-profile "env1"
Сборка:
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[14]
      Now listening on: https://localhost:81
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[0]
      Application started. Press Ctrl+C to shut down.
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[0]
      Hosting environment: Environment1
info: Microsoft.Hosting.Lifetime[0]
      Content root path: C:\Learn\VebApi\VebApi\
  
```

Рис. 6. Одновременный запуск веб-серверов 1-2

Fig. 6. Simultaneous launch of web servers 1-2

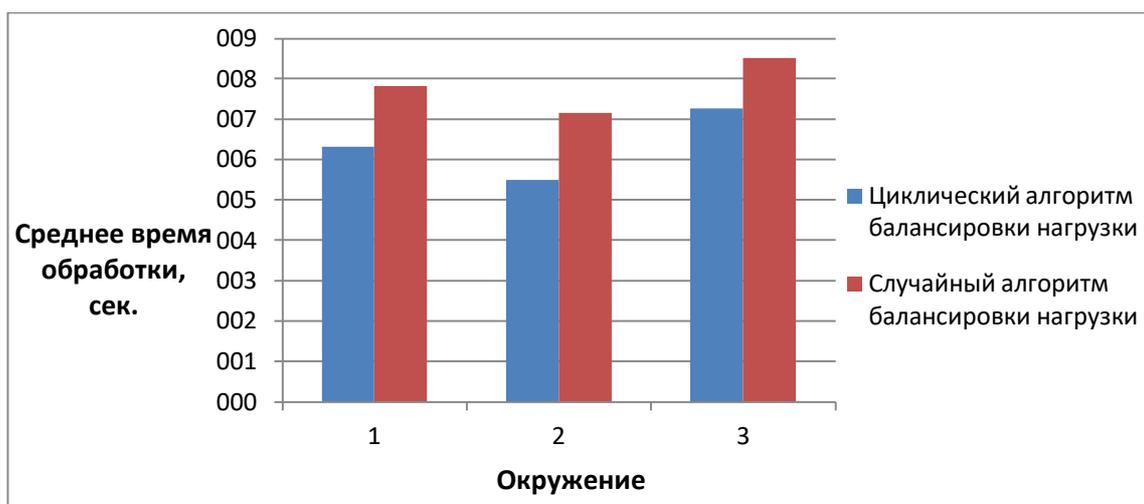


Рис. 7. Результаты экспериментов балансировки нагрузки в сети

Fig. 7. Results of network load balancing experiments

Кроме этого алгоритм, основанный на случайном характере, может приводить к потере запросов. Такая ситуация может возникнуть в случае, если сеть будет случайно переключать запросы на неработающие веб-серверы, в таком случае конечный пользователь не сможет получить необходимые данные. Это существенный недостаток в отличие от циклической балансировки нагрузки.

Выводы

Балансировка нагрузки данных в компьютерной сети является важным параметром сети. Из-за балансировки нагрузки в сети может уменьшаться или увеличиваться задержка передачи, разброс от среднего значения джиттера. Таким образом, балансировка нагрузки в сети влияет на временные характеристики и пропускную способность сети.

Управление и оптимизацию балансировки нагрузки можно осуществлять как программным, так и аппаратным способами. В статье уделяется внимание балансировки нагрузки данных на прикладном уровне приложений.

Кратко рассмотрена аппаратная балансировка нагрузки, которая решается в рамках непосредственно сетевого оборудования, к примеру, в коммутаторах. Это решается диспетчером управ-

ления очередями в коммутаторе Ethernet, который управляет полосой пропускания и очередями. Описаны циклические алгоритмы WRR и DRR, а также алгоритм с временной селекцией кадров TSS в диспетчерах коммутатора, которые реализуют эффективную аппаратную балансировку нагрузки.

Рассмотрена программная балансировка нагрузки данных в сети. В качестве программной балансировки нагрузки использовался веб-сервер и обратный прокси-сервер Nginx, на сервере было запущено 3 Docker контейнера, сделанного на основе Asp.net приложения, запущенных на разных окружениях. Произведена настройка, конфигурация сети и использовался циклический алгоритм балансировки нагрузки RR в сервере Nginx.

Было проведено исследование сети с разным количеством окружений в сети, веб-серверов, запросов данных. Циклический алгоритм балансировки нагрузки в Nginx является более эффективным по сравнению со случайным алгоритмом, это было показано в ходе экспериментов.

Таким образом, аппаратные и программные алгоритмы балансировки нагрузки в распределенной сети повышают пропускную способность сети, ее эффективность и быстродействие.

Список литературы

1. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. 4-е изд. СПб.: Питер, 2010. 943 с.
2. Описание стандарта IEEE 802.1q. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.1Q (дата обращения 18.06.2022).

3. Никишин К. И. Механизм управления трафиком реального времени в коммутаторе Ethernet // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 10. С. 32–37.
4. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H. et al. Openflow: enabling innovation in campus networks // ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, vol. 38, no. 2, pp. 69–74.
5. Kobayashi M., Seetharaman S., Parulkar G., Appenzeller G., Little J., Van Reijendam J., McKeown N. Maturing of OpenFlow and Software-Defined Networking Through Deployments // Computer Networks. 2014. Vol. 61. P. 151–175.
6. Корячко В. П., Перепелкин Д. А. Программно-конфигурируемые сети. М.: Горячая линия – Телеком, 2020. 288 с.
7. Shalimov A. et al. Advanced study of SDN/OpenFlow controllers // Proceedings of the 9th Central & Eastern European Software Engineering Conference in Russia. ACM, 2013.
8. Перепелкин Д. А., Бышов В. С. Балансировка потоков данных в программно-конфигурируемых сетях с обеспечением качества обслуживания сетевых сервисов // Радиотехника. 2016. № 11. С. 111–119.
9. Никульчев Е. В., Паяин С. В., Плужник Е. В. Динамическое управление трафиком программно-конфигурируемых сетей в облачной инфраструктуре // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 3 (45). С. 54–57.
10. Kopetz H. Real-time systems design principles for distributed embedded applications. New York: Springer, 2011. 396 p.
11. The Time-Triggered Ethernet (TTE) design / H. Kopetz, A. Ademaj, P. Grillinger, K. Steinhammer // International Symposium on Object-oriented Real-time Distributed Computing. 2005. P. 22–33.
12. Никишин К. И., Коннов Н. Н., Пашенко Д. В. Моделирование систем на базе технологии Time-Triggered Ethernet // Информационные технологии и математическое моделирование: материалы XV Междунар. конф. имени А. Ф. Терпугова. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2016. Ч. 2. С. 117–122.
13. Перепелкин Д. А. Концептуальный подход динамического формирования трафика программно-конфигурируемых телекоммуникационных сетей с балансировкой нагрузки // Информационные технологии. 2015. Т. 21. № 8. С. 602–610.
14. Механов В.Б., Кизилов, Е.А. Моделирование цветными сетями Петри обслуживания очередей алгоритмом WRR // Труды IX Международной научно-технической конференции «Новые информационные технологии и системы». Пенза: Изд-во ПГУ, 2010. Ч. 1. С. 67 – 73.
15. Артемов И. В., Коннов М. Н., Никишин К. И. Анализ эффективности адаптивного алгоритма формирования виртуального таймслота в сетевом коммутаторе // Тру-

ды Международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза: Изд-во ПГУ, 2020. Т.2. С. 298–302.

16. Scheduling queues in the Ethernet switch, considering the waiting time of frames / E. Kizilov, N. Konnov, K. Nikishin, D. Pashchenko, D. Trokoz // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 44. P. 01011-p.1–01011-p. 5.

17. Учет времени поступления кадров для управления очередями в коммутаторе / Е. А. Кизилов, Н. Н. Коннов, В. Б. Механов, К. И. Никишин // Телематика-2014: тр. XXI Всерос. науч.-метод. конф. СПб. : СПбГУ ИТМО, 2014. С. 134–136.

18. Jensen K. An Introduction to the Practical Use of Coloured Petri Nets // Lectures on Petri Nets II: Applications. Berlin: Springer, 1998. P. 237-292.

19. Jensen K., Kristensen L.M. Coloured Petri Nets. Modelling and Validation of Concurrent Systems. Berlin: Springer, 2009. 384 p.

20. Nikishin K., Konnov N. Schedule Time-Triggered Ethernet // International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020. DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261540.

21. Никишин К. И., Коннов Н. Н. Генератор трафика Ethernet на основе цветных сетей Петри // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2016. № 1 (17). С. 299–307.

References

1. Olifer V. G., Olifer N. A. *Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly* [Computer networks. Principles, technologies, protocols]. St. Petersburg, 2010. 943 p.

2. Opisanie standarta IEEE 802.1q [Description of the IEEE 802.1q standard]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.1Q (accessed 01.06.2022).

3. Nikishin K. I. Mekhanizm upravleniya trafikom real'nogo vremeni v kommutatore Ethernet [The mechanism of management real-time traffic in the switch Ethernet]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Herald of Computer and Information Technologies*, 2015, no. 10, pp. 32–37.

4. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H. et al. Openflow: enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2008, vol. 38, no. 2, pp. 69–74.

5. Kobayashi M., Seetharaman S., Parulkar G., Appenzeller G., Little J., Van Reijendam J., McKeown N. Maturing of OpenFlow and Software-Defined Networking Through Deployments. *Computer Networks*, 2014, vol. 61, pp. 151–175.

6. Koryachko V. P., Perepelkin D. A. *Programmno-konfiguriruemye seti* [Software defined networks]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2020, 288 p.

7. Shalimov A. et al. Advanced study of SDN/OpenFlow controllers. *Proceedings of the 9th Central & Eastern European Software Engineering Conference in Russia*. ACM, 2013.

8. Perepelkin D. A., Byshov V. S. Balansirovka potokov dannykh v programmno-konfiguriruemyykh setyakh s obespecheniem kachestva obsluzhivaniya setevykh servisov [Balancing data flows in software defined networks with ensuring the quality of service of network services]. *Radiotekhnika = Radio Engineering*, 2016, no. 11, pp. 111-119.

9. Nikulchev E. V., Payin S. V., Pluzhnik E. V. Dinamicheskoe upravlenie trafikom programmno-konfiguriruemyykh setei v oblachnoi infrastrukture [Dynamic traffic management of software defined networks in cloud infrastructure]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2013, no. 3 (45), pp. 54-57.

10. Kopetz H. Real-time systems design principles for distributed embedded applications. New York: Springer, 2011, 396 p.

11. Kopetz H., Ademaj A., Grillinger P., Steinhammer K. The Time-Triggered Ethernet (TTE) design. *International Symposium on Object-oriented Real-time Distributed Computing*, 2005, pp. 22–33.

12. Nikishin K. I., Konov N. N., Pashchenko D. V. [Modelling of systems using Time-Triggered Ethernet]. *Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie: materialy XV Mezhdunar. konf. imeni A. F. Terpugova* [Information technologies and mathematical modeling. Materials of the XV International Conf. named after A. F. Terpugov]. Tomsk, Tomsk University Publ., 2016, pt 2, pp. 117-122 (In Russ.).

13. Perepelkin D. A. Kontseptual'nyi podkhod dinamicheskogo formirovaniya trafika programmno-konfiguriruemyykh telekommunikatsionnykh setei s balansirovkoi nagruzki [Conceptual approach of dynamic traffic generation of software defined telecommunication networks with load balancing]. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technologies*, 2015, vol. 21, no. 8, pp. 602-610.

14. Mekhanov V. B., Kizilov E. A. [Modeling of queue dispatcher by the WRR algorithm with colored Petri nets]. *Trudy IX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Novye informatsionnye tekhnologii i sistemy"* [Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference "New Information technologies and Systems"], Penza, 2010, pp. 67-73 (In Russ.)

15. Artemov I. V., Konnov M. N., Nikishin K. I. [Analysis of the effectiveness of an adaptive algorithm for forming a virtual timeslot in a network switch]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»* [Proceedings of the International Symposium "Reliability and quality"]. Penza, 2020, vol.2, pp. 298-302 (In Russ.).

16. Kizilov E., Konnov N., Nikishin K., Pashchenko D., Trokoz D. Scheduling queues in the Ethernet switch, considering the waiting time of frames. *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 44, pp. 01011-p.1–01011-p. 5.

17. Kizilov E. A., Konnov N. N., Mekhanov V. B., Nikishin K. I. [Accounting of the delivery time for control of queue dispatcher in the switch]. *Telematika-2014»: tr. XKHI Vse-*

ros. nauch.-metod. konf. ["Telematics-2014"Proceedings of the XXI Scientific and Technical Conference]. St. Petersburg : St. Petersburg State University ITMO Publ., 2014, pp. 134-136. (In Russ.)

18. Jensen K. An Introduction to the Practical Use of Coloured Petri Nets. Lectures on Petri Nets II: Applications. Berlin: Springer, 1998, pp. 237-292.

19. Jensen K., Kristensen L.M. Coloured Petri Nets. Modelling and Validation of Concurrent Systems. Berlin: Springer, 2009, 384 p.

20. Nikishin K., Konnov N. Schedule Time-Triggered Ethernet. *International Conference on Engineering Management of Communication and Technology*, EMCTECH 2020. DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261540.

21. Nikishin K. I., Konnov N. N. Generator trafika Ethernet na osnove tsvetnykh setei Petri [The traffic generator of switch Ethernet using colored Petri nets]. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society*, 2016, no. 1 (17), pp. 299–307.

Информация об авторе / Information about the Author

Никишин Кирилл Игоревич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Вычислительная техника», Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: nkipnz@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7966-7833>

Kirill I. Nikishin Cand. of Sci. (Engineering), Senior Lecturer of Computer Engineering Department, Penza State University, Penza, Russian Federation, e-mail: nkipnz@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7966-7833>

Построение системы автоматического управления шаровой мельницей с применением наблюдателя возмущений и виртуального анализатора

А. А. Закамалдин ¹ ✉, А. А. Шилин ²

¹ ООО "Электра +"

ул. Малая Бухарестская, д. 6 к1, г. Санкт-Петербург 192288, Российская Федерация

² ОЭЭ ИШЭ НИТПУ

пр. Ленина, д. 30, г. Томск 634050, Российская Федерация

✉ e-mail: aaz5@tpu.ru

Резюме

Цель исследования. Повышение производительности по руде агрегата измельчения при воздействии внешних возмущений, не допуская перегрузки мельницы в условиях эксплуатации, близких к перегрузке.

Методы. Для достижения поставленной цели предложена новая система автоматического управления (САУ) заполнением материалом шаровой мельницы с разгрузкой через торцевую решетку в замкнутом цикле измельчения с применением управления с прогнозирующей моделью и активным подавлением возмущающих воздействий (MPC-DOB). В дополнение к САУ для контроля за перегрузом мельницы предложен виртуальный анализатор (ВА) веса материала в мельнице на основе разработанной модели технологического процесса. Проведено тестирование системы управления на лабораторной установке, где в качестве объекта выступала модель мельницы в Simulink, а система управления была реализована на ПЛК. Тестировались САУ с ПИД-регуляторами, MPC, MPC-DOB для различных сценариев.

Результаты. MPC-DOB показал эффективность по отношению к ПИД и MPC при синусоидальных и ступенчатых возмущениях, сократив RSD на 4-7 %. Совместное применение MPC-DOB и ВА позволило повысить производительность измельчения на 1 % и улучшить качество стабилизации вибрации мельницы в режиме функциональной неустойчивости.

Заключение. Разработанная САУ может быть применена в АСУТП измельчения в шаровой мельнице с решеткой для повышения производительности и устойчивости технологического процесса и уменьшения затрат электроэнергии приводом мельницы.

Ключевые слова: перегруз мельницы; управление с прогнозирующей моделью; шаровая мельница с решеткой; виртуальный анализатор; наблюдатель возмущений; моделирование.

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

Для цитирования: Закамалдин А. А., Шилин А. А. Построение системы автоматического управления шаровой мельницей с применением наблюдателя возмущений и виртуального анализатора // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(3): 112-128. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-112-128>.

Поступила в редакцию 21.07.2022

Подписана в печать 05.09.2022

Опубликована 30.09.2022

Control Strategy of Ball Mill Based on Disturbance Observer and a Virtual Analyzer of Overload

Andrei A. Zakamaldin ¹ ✉, Aleksandr A. Shilin ²

¹ "Electra +" Ltd,
6, build. 1 Malaya Bukharestskaya, St. Petersburg 195251, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin ave., Tomsk 634050, Russian Federation

✉ e-mail: aaz5@tpu.ru

Abstract

Purpose of research.. Increasing the ore productivity of the grinding mill under the influence of external disturbances, preventing overloading of the mill in operating conditions close to overloading.

Methods. To achieve this goal, it is proposed a new automatic control system (ACS) for ore volumetric filling of grate-discharge ball mill in a closed grinding cycle using model predictive control and active disturbance observer (MPC-DOB). And in addition, virtual analyzer (VA) of the ore weight in the mill based on the developed model of the grinding process is proposed for mill overload control. The ACS was tested on a laboratory installation with the mill PC-model in Simulink and the PLC based implementation of control algorithms.

Results. MPC-DOB was compared with other ACS based on PID, MPC controllers for various test scenarios and show high performance under the influence of sinusoidal and step disturbances by reducing relative standard deviation (RSD) by 4-7 %. The combined using of MPC-DOB and VA made it possible to increase the grinding process ore productivity by 1 % and improve the quality of mill vibration stabilization in the mode of functional instability.

Conclusion. The developed ACS can be used in the process control system for grinding in a ball mill with a grate to increase the productivity and stability of the technological process and reduce the energy consumption of the mill drive.

Keywords: mill overload; model predictive control; grate-discharge ball mill; virtual analyzer; disturbance observer; 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: Zakamaldin A. A., Shilin A. A. Control Strategy of Ball Mill Based on Disturbance Observer and a Virtual Analyzer of Overload. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(3); 112-128 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-112-128>.

Received 21.07.2022

Accepted 05.09.2022

Published 30.09.2022

Введение

Известно, что повышение производительности барабанных шаровых мель-

ниц может значительно повысить экономическую отдачу производства. Это связано с тем, что, во-первых, увеличивается выход продукта, и, во-вторых,

что более важно, снижается удельный расход энергии на тонну измельченной руды [1]. Эксплуатируя мельницу не на максимальной производительности, процесс измельчения достаточно устойчив, изменение влажности руды и другие возмущения не выведут процесс измельчения из нормального режима. Но при увеличении производительности растет вероятность вывода процесса в режим функциональной неустойчивости – перегруза. За стабильность процесса измельчения и контроль за перегрузом отвечает система автоматического управления (САУ) заполнением мельницы материалом.

Первая проблема существующих САУ заключается в эффективности используемых методов регулирования параметра заполнения мельницы, среди которых методы, основанные на экспертных оценках, производственных правилах, ПИД законах регулирования и более современные [2, 3]. Такие подходы имеют ряд ограничений вследствие того, что имеются чувствительные возмущения по влажности исходной руды [4], поступающей на измельчение, а также значительные запаздывания по каналам управления [5], для управления в режиме эксплуатации мельницы с максимальной производительностью, когда имеется вероятность перегруза мельницы рудой. При этом управляемость усугубляется тем, что параметр заполнения мельницы измеряется не напрямую, а по косвенным параметрам: вибрация подшипника мельницы, акустический шум,

активная мощность привода мельницы и другие.

Вторая проблема заключается в том, что основной метод контроля за перегрузом в таких САУ основан на взаимном поведении параметров активной мощности электропривода мельницы и вибрации коренного подшипника у разгрузки мельницы. Большое распространение получил вибродиагностический метод [6], однако такие подходы стабильны и эффективны, но вокруг заданной номинальной рабочей точки [7] и, сравнивая с современными возможностями, уже являются устаревшими [8]. Отмечается, что управление мельницей по параметрам вибрации и мощности имеет достаточно противоречивый характер из-за возможного перегруза мельницы при высоких производительностях [9]. Это связано с тем, что перегруз наступает раньше, чем система по данным параметрам определит перегруз. Используя датчики вибрации, очень важно на аппаратном уровне настроить их на верный полезный частотный диапазон, который имеет тенденцию изменяться в ходе эксплуатации [10]. Также из-за сильной зашумленности аналоговый сигнал вибрации поддается сильной программной фильтрации – фильтрами с большим временем фильтрации. Выделение полезного сигнала активной мощности привода мельницы также может стать проблемой при эксплуатации. Изменение мощности за контрольный временной промежуток при работе с высокой производительностью

выявит перегруз только тогда, когда мельница уже находится в центрифужном режиме.

Для решения данных проблем в работе рассмотрена структура САУ на основе регулятора с прогнозирующей моделью (MPC) с наблюдателем возмущений (DOB) для компенсации возмущений влажности исходной руды и виртуальным анализатором (ВА) перегруза мельницы.

Материалы и методы

ВА перегруза мельницы – модель для прогнозирования массы измельчаемого материала внутри мельницы для оперативного формирования ограничений по максимальной производительности по исходной руде. Для синтеза

оптимального корректирующего динамического элемента ВА сложно предложить обобщенную универсальную методику [11], поэтому предложена модель, сформулированная по физическим принципам измельчения. Моделирование динамики технологического процесса измельчения рассматривалось в работах [12-16]. Используемая математическая модель основана на системе уравнений, разработанной авторами в [17], средняя абсолютная ошибка в процентах которой составила 7 % при тестировании на данных реального технологического процесса. Модель описывает одностадийный замкнутый цикл мокрого измельчения в мельнице барабанного типа с разгрузкой через торцевую решетку (рис. 1).

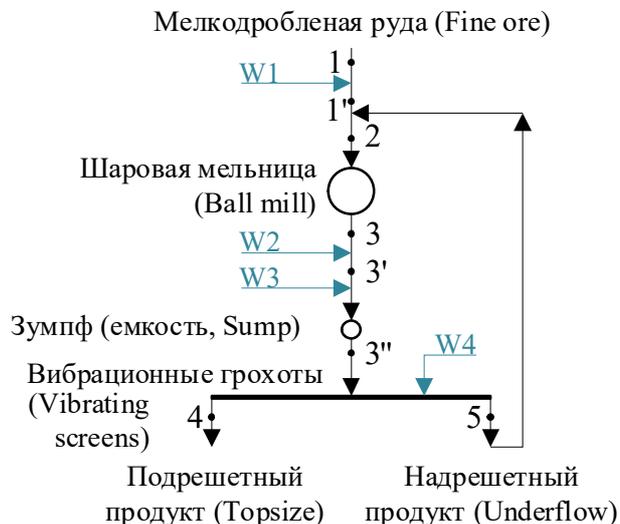


Рис. 1. Одностадийная замкнутая схема измельчения: **1** – мелкодробленая руда; **1'** – мелкодробленая руда с водой **W1**; **2** – пульпа в загрузку мельницы; **3** – пульпа в сливе мельницы; **3'** – слив мельницы с водой **W2**; **3''** – пульпа на классификацию; **4** – подрешетный продукт грохочения; **5** – надрешетный продукт грохочения; **W1** – вода в загрузку мельницы; **W2** – вода в разгрузку мельницы; **W3** – вода в зумпф; **W4** – вода на классификацию

Fig. 1. Scheme of the one-stage closed circuit grinding: **1** – fine ore; **1'** – fine ore with water **W1**; **2** – pulp in mill feed; **3** – pulp in mill discharge; **3'** – pulp after mill discharge with water **W2**; **3''** – pulp for classification; **4** – topsize to flotation; **5** – underflow into the mill; **W1** – water in the mill feed; **W2** – water in the mill discharge; **W3** – water in the sump; **W4** – water for classification

Для модели было принято, что концентрации всех размерных фракций равномерно распределены по объему материала в мельнице V_m , соответственно, плотность пульпы одинакова по всему объему. Для расчета объема материала внутри мельницы было принято, что распределение пульпы не зависит от скорости вращения мельницы и описывается моделью неравномерного распределения от загрузочной цапфы до решетки по длине мельницы. Также было принято, что истечение жидкости из торцевой решетки с множеством конических наружу отверстий заменяется истечением из одного круглого конического отверстия площадью, соответствующей текущему уровню пульпы у торцевой решетки. Исходя из этого, расход пульпы из мельницы Q_3 зависит только от уровня пульпы у загрузочной решетки и параметров решетки. Уравнение материального баланса для мельницы в таком случае имеет вид:

$$V_m(t) \frac{dp}{dt} = Q_{1'}(t) \rho_{1'}(t) + Q_5(t) \rho_5(t) - Q_3(t) \rho_3(t). \quad (1)$$

Учитывая, принятые допущения, решение уравнения материального баланса (1) позволит определить плотность пульпы в мельнице и рассчитать ее массу G . Входными данными для расчета G являются: производительность мельницы Q_1 ; расходы воды W_1 ,

W_2 , W_3 , W_4 во все точки замкнутого цикла измельчения и параметры технологического оборудования R :

$$f(Q_1, W_1, W_2, W_3, W_4, R, t) = G \rightarrow Q_{\max}.$$

Поскольку ВА необходим для предупреждения перегруза, ВА дополняет структуру разработанной САУ (рис. 2) и формирует ограничения производительности Q_{\max} для регулятора с прогнозирующей моделью MPC в момент достижения критического значения массы материала в мельнице G_{\max} , установленного заранее на основании опытно-промышленной эксплуатации.

В качестве прогнозирующей модели используется линейная модель объекта управления (ОУ) с временной задержкой τ :

$$G_n(s) = g_n(s) e^{-\tau s},$$

представленная в пространстве состояний, дискретизированная с интервалом $T_s = 1$ с экстраполятором нулевого порядка:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B\Delta u(k - \tau_k), \\ y(k) &= Cx(k), \end{aligned}$$

где $g_n(s)$ – линейная часть передаточной функции $G_n(s)$; k – шаг дискретизации; $x(k)$ – вектор состояний; $u(k - \tau_k)$ – вектор входов; $y(k)$ – вектор выходов; A , B , C – матрицы динамики системы, входов и выходов соответственно; τ_k – целая часть от τ / T_s .

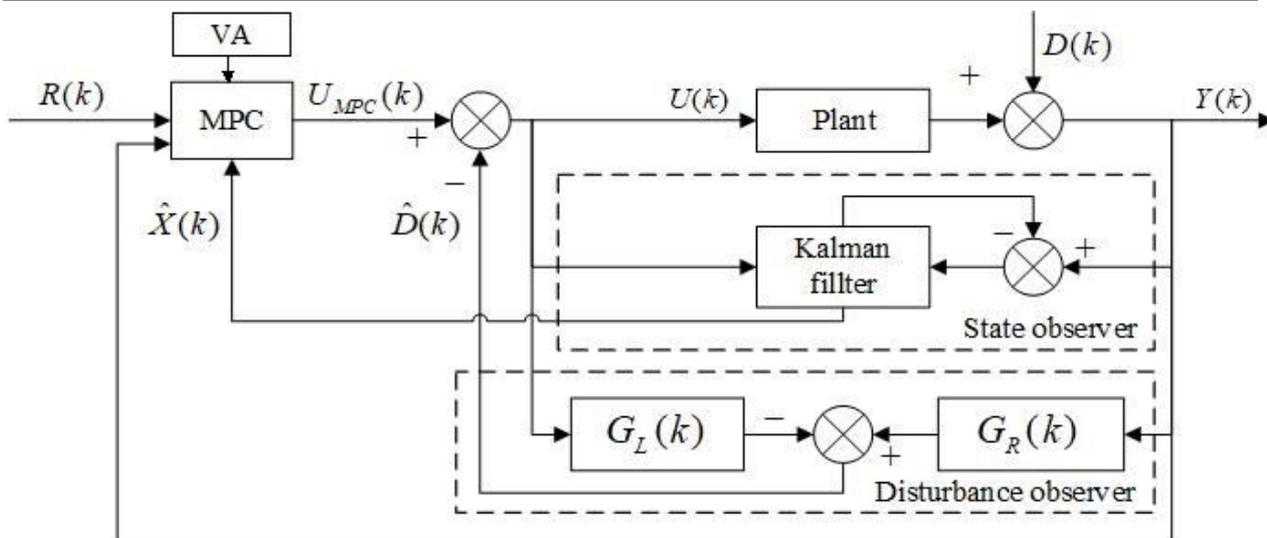


Рис. 2. Структурная схема САУ с прогнозирующей моделью, наблюдателем возмущений и виртуальным анализатором перегруза (MPC-DOB+VA): $R(k)$ – сигнал задания; $U_{MPC}(k)$ – выход регулятора MPC; $U(k)$ – сигнал управления; $D(k)$ – возмущения; $\hat{D}(k)$ – оценка возмущений; $Y(k)$ – измеренный выходной сигнал; $\hat{X}(k)$ – оценка состояний; $G_L(k)$ – передаточная функция левой части DOB в дискретном времени; $G_R(k)$ передаточная функция правой части DOB в дискретном времени; k – шаг дискретизации

Fig. 2. Block diagram of ACS control with model predictive controller, disturbance observer and virtual analyzer of overload (MPC-DOB+VA): $R(k)$ – reference signals; $U_{MPC}(k)$ – MPC controller outputs; $U(k)$ – manipulated variables; $D(k)$ – disturbances; $\hat{D}(k)$ – estimated disturbances; $Y(k)$ – current measured output signals; $\hat{X}(k)$ – estimated states; $G_L(k)$ – transfer function of left part of disturbance observer model in discrete time; $G_R(k)$ – transfer function of right part of disturbance observer model in discrete time; k – sampling step

Оптимизационная задача квадратичного программирования для поиска оптимальной управляющей последовательности решается численным методом Хилдрета, в которой учитываются линейные ограничения на входные переменные:

$$u^{\min} \leq u(k) \leq u^{\max},$$

$$\Delta u^{\min} \leq \Delta u(k) \leq \Delta u^{\max},$$

где u^{\min} , u^{\max} , Δu^{\min} , Δu^{\max} – минимум, максимум, минимальное и максимально приращение входной переменной. Учитывая рекомендации [18], ограничения на выходы не учитываются, так

как сходимость решение такой задачи не гарантируется. Алгоритм решения задачи оптимизации выполняется циклически, с целью минимизировать квадратическую ошибку приращения входа $\Delta u(k)$, между прогнозируемым выходом системы и уставкой $R(k)$, пока не достигается заданная точность или будет превышено заданное число итераций.

Для быстрой подстройки выхода прогнозирующей модели под текущее значение выхода ОУ используется наблюдатель состояния на основе дискретного линейного фильтра Калмана. На выходе наблюдателя получаем оцен-

ку вектора состояний системы для следующей итерации:

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + K_{ob}(y(k) - C\hat{x}(k)).$$

Весовая матрица K_{ob} наблюдателя состояний находится методом размещения полюсов [18], $\hat{x}(k)$ – вектор состояния системы на текущей итерации k .

Наблюдатель возмущений DOB [4, 5] применен в структуре САУ в качестве компенсации как действующих внешних возмущений, так и связанных с несоответствием модели. Для этого возмущения оцениваются следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{D}(s) &= G_R(s) - G_L(s) = \\ &= H(s)g_n^{-1}(s)Y(s) - H(s)e^{-ts}U(s), \end{aligned}$$

эффективность подавления возмущений зависит от выбранного фильтра $H(s)$.

САУ со структурой (рис. 2) реализована в виде программного кода для ПЛК на языках стандарта МЭК 61318-3. Программа требует до 120 Кбайт памяти для хранения переменных и поддерживает модели ОУ до 4 входов и 4 выходов при максимальных горизонтах прогнозирования и управления – 200 и 4 соответственно.

Тестирование САУ на ПЛК было проведено в реальном времени в контуре с Simulink-моделью мельницы [17] посредством Modbus OPC сервера для обмена данными между PC и PLC (рис. 3). В работе использовался ПЛК Schneider Electric Modicon M580, программируемый в среде Unity Pro XL.

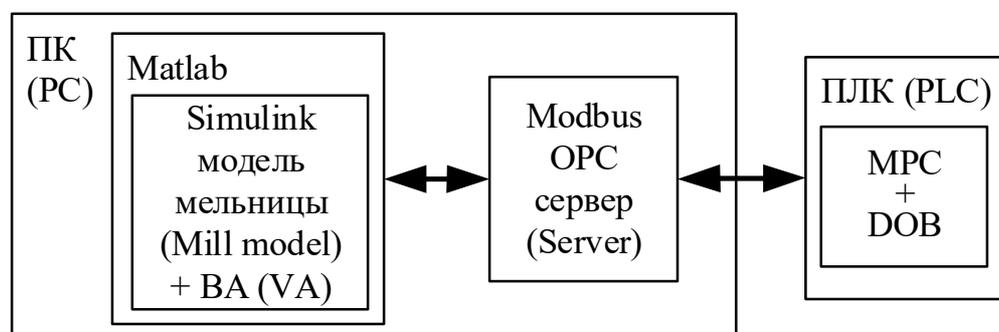


Рис. 3. Структура экспериментальной установки

Fig. 3. The schematic diagram of the experimental setup

Для оценки эффективности САУ использовались квадратичный интеграл от ошибки в замкнутой системе (Integral Squared Error, ISE), относительное среднеквадратическое отклонение (Relative Standard Deviation, RSD) и перерегулирование σ :

$$ISE = \int_{t_1}^{t_2} (y(t) - y_{sp})^2 dt,$$

$$RSD = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (y(k) - y_{sp})^2}{n-1}} \cdot \frac{100\%}{y_{sp}},$$

$$\sigma = \frac{y_{max} - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100\%,$$

где $y(t)$ – значение стабилизируемого параметра во время t ; $y(k)$ – значение стабилизируемого параметра на шаге k ; y_{sp} – уставка стабилизируемого параметра; t_1, t_2 – время начала и конца расчета критерия ISE; y_{max} – максимальное значение стабилизируемого параметра; k – шаг дискретности; n – общее количество точек данных.

Эксперименты №1-3, 5 проводились с учетом случайных шумов по контролируемым величинам и их программной фильтрации на протяжении всего времени моделирования. Регулятор MPC используется максимально простой структуры SISO: выход ОУ – вибрация мельницы, %; вход ОУ – производительность мельницы, т/ч; горизонт прогнозирования $N_p = 200$; горизонт управления $N_c = 3$; вес для сигнала управления = 0,005; ограничение $Q_{max} = 250$ т/ч. В ПЛК блок MPC вызывается один раз в секунду. Прогнозирующая модель требуемого качества получена методами аппроксимации ОУ лине-

аризованной моделью более низкого порядка [19]. Время задержки по каналу производительность-вибрация для модели составляет 10 мин. Передаточная функция для фильтра наблюдателя возмущений:

$$H(s) = \frac{1,1}{100s^2 + 5s + 1}.$$

Непосредственное описание реализации подхода прогнозирующего управления с наблюдателем возмущений на ПЛК и поиск оптимальных настроек параметров для данной задачи выходит за рамки статьи и будут рассмотрены в отдельной работе.

Результаты и их обсуждение

А. Эксперимент №1 – стабилизация шума при изменении уставки (SP) с 16 % до 11 % в момент $t = 500$ с, без внешних возмущений. Результаты и эффективность моделирования всех САУ представлены соответственно на рис. 4 и в табл. 1.

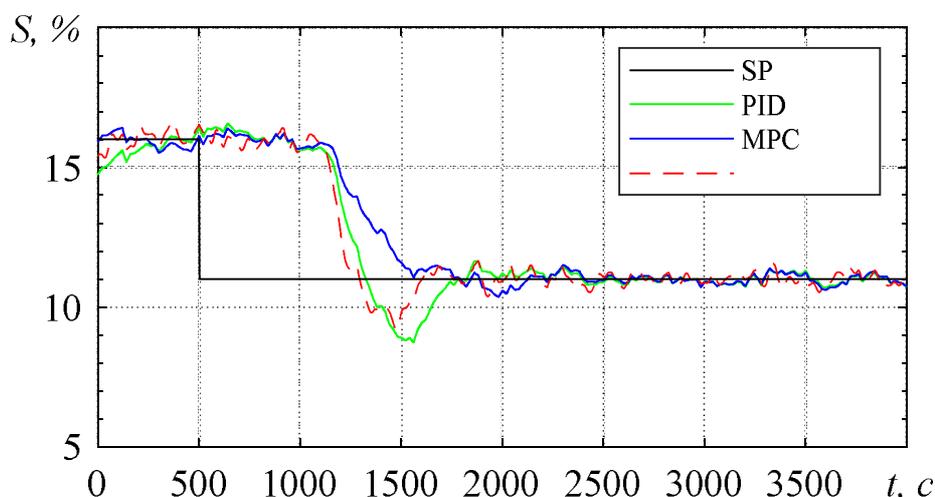


Рис. 4. Эксперимент №1: результаты моделирования

Fig. 4. Stabilization of mill vibration for various control methods in the conditions of experiment №1

Таблица 1. Статистическая эффективность стратегий управления на изменение уставки**Table 1.** Statistical efficiency of control methods for setpoint changes

Стратегия управления / Control method	Критерии качества регулирования / Performance criteria		
	ISE	RSD, %	σ , %
PID	5154,3	11,925	20,460
MPC	6026,3	12,894	5,748
MPC-DOB	4432,4	11,062	16,209

PID регулирование имеет нежелательное перерегулирование ($\sigma = 20,460\%$) в момент $t = 1500$ с, MPC показывает медленное но надежное регулирование ($\sigma = 5,748\%$), что в данном случае важнее быстрой стабилизации с наименьшей интегральной ошибкой ISE, которую показывает MPC-DOB. Как видно из результатов, DOB не дает решающее преимущество при отсутствии возмущений.

Б. Эксперимент №2 – стабилизация шума при изменении уставки (SP) с 16 % до 11 % в момент времени 500 с, при воздействии синусоидальных возмущений с амплитудой 0,8 %, периодом

900 с на протяжении всего времени моделирования – 4000 с. Результаты и эффективность моделирования всех САУ представлены соответственно на рис. 5 и в табл. 2.

У ПИД-регулирования наблюдается отклонение в момент 1500 с более 3 % от уставки ($\sigma = 31,377\%$), которое может привести к перегрузу мельницы. Падение шума ниже 6 % на практике зачастую является фактическим перегрузом мельницы. По ISE и RSD видно, что MPC-DOB успешно подавляет синусоидальные возмущения в отличие от PID и MPC, что также видно на рис. 6.

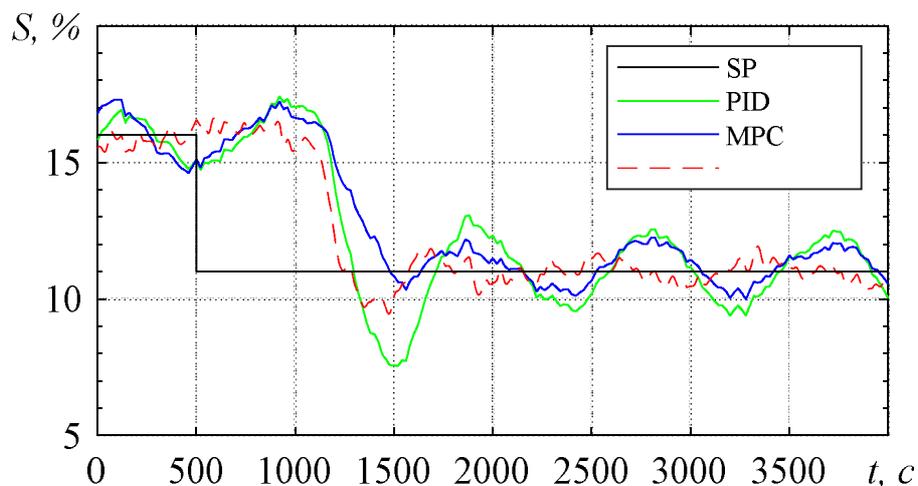
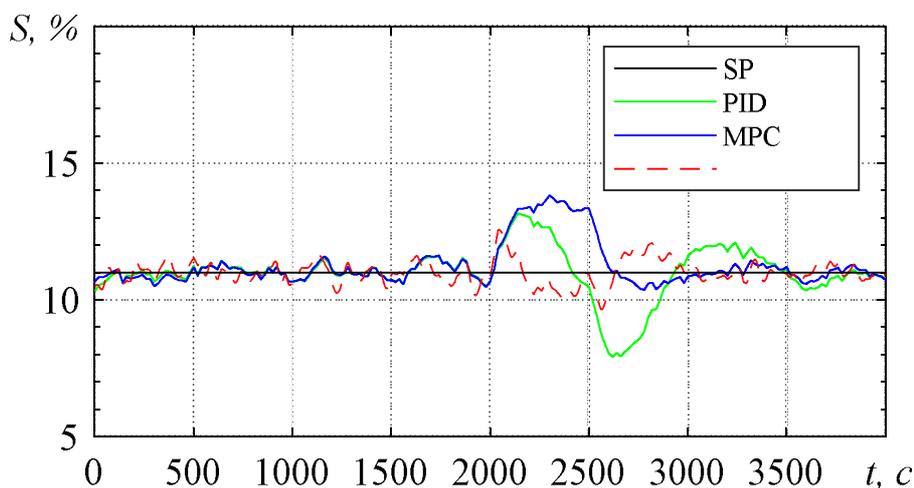
**Рис. 5.** Эксперимент №2: результаты моделирования**Fig. 5.** Stabilization of mill vibration for various control methods in the conditions of experiment №2

Таблица 2. Статистическая эффективность стратегий управления на изменение уставки при синусоидальных возмущениях**Table 2.** Statistical efficiency of control methods for sinusoidal disturbances

Стратегия управления / Control method	Критерии качества регулирования / Performance criteria		
	ISE	RSD, %	σ , %
PID	10994,3	17,415	31,377
MPC	8016,51	14,872	11,234
MPC-DOB	4005,4	10,515	14,092

В. Эксперимент №3 – стабилизация шума при воздействии постоянного возмущения 3 % в интервале времени 1700-3000 с. Результаты и эффектив-

ность моделирования всех САУ представлены соответственно на рис. 6 и в табл. 3.

**Рис. 6.** Эксперимент №3: результаты моделирования**Fig. 6.** Stabilization of mill vibration for various control methods in the conditions of experiment №3**Таблица 3.** Статистическая эффективность стратегий управления на постоянное возмущающее воздействие (на основе моделирования)**Table 3.** Statistical efficiency of control methods for constant disturbances

Стратегия управления / Control method	Критерии качества регулирования / Performance criteria		
	ISE	RSD, %	σ , %
PID	3348,7	9,603	28,036
MPC	2814,1	8,803	25,644
MPC-DOB	673,7	4,308	14,249

Результаты эксперимента №3 в условиях ступенчатого возмущения, которое на практике может быть результатом изменения влажности исходной руды, похожи на результаты с синусоидальным возмущением. Лучшие показатели ($ISE = 673,7$, $RSD = 4,308\%$, $\sigma = 14,249\%$) у САУ с наблюдателем возмущений (MPC-DOB). ПИД-регулирование отличается опасным отклоне-

нием в момент 2700 с, а MPC медленным, но безопасным регулированием.

Г. Эксперимент №4 – проверка адекватности ВА веса материала в мельнице по данным расходов воды, производительности (рис. 7, а) и шума (рис. 7, б), полученных с комплекса измельчения апатито-нефелиновой руды с мельницей типа МШР 4,5х5,0.

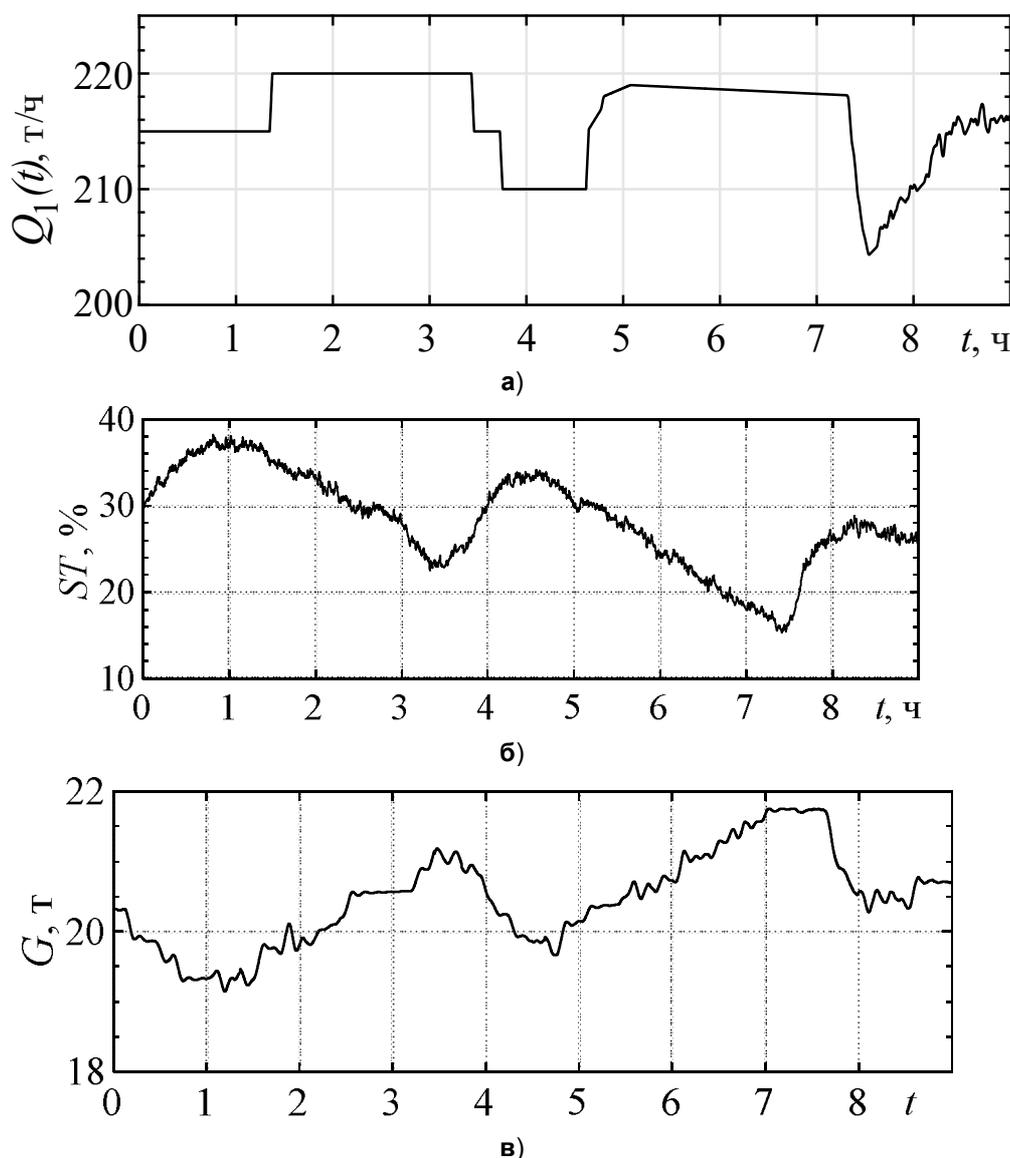


Рис. 7. Эксперимент №4: результаты моделирования веса материала в мельнице G :
а – производительность (реальные данные); **б** – вибрация мельницы (реальные данные); **в** – вес материала в мельнице (данные моделирования)

Fig. 7. Quality verification of the VA of mill overload: **a** – ore productivity (real data); **б** – mill vibration (real data); **в** – weight of material in the mill (VA output)

На рис.7 видно, что рост графика ST приводит к падению графика G и наоборот, что говорит о сильной зависимости между переменными – отрицательной корреляции. С точки зрения технологии процесса измельчения, при наполнении мельницы материалом, а именно росте массы материала в мельнице, должна снижаться вибрация, что видно по полученным графикам (рис. 7) и подтверждает адекватность модели и возможности оценки перегруза по параметру G.

Д. Эксперимент №5 – моделирование работы САУ в режиме, близком к перегрузу, – из установившегося режима при ручном управлении производительностью мельницы $Q = 225$ т/ч, включается САУ с уставкой шума $ST = 7\%$ в момент $t = 3,92$ ч. В эксперименте рассмотрены САУ с ПИД, MPC и MPC-DOV+BA, На протяжении всего времени моделирования учитываются синусоидальные возмущения с амплитудой $0,3\%$, периодом 1200 с. Данный эксперимент необходим для демонстрации преимущества предлагаемой стратегии САУ с MPC-DOV+BA и принятые в эксперименте настройки актуальны для конкретного рассмотренного случая. Критическая масса $G_{max} = 93\%$ ($28,8$ т) принята из оценки, что перегруз для мельницы с износом 30% при нормальной руде (влажность 3% , небедная по хим. составу) наступил бы при производительности $Q \approx 245-250$ т/ч, что соответствует $G = 100\%$ (32 т). При достижении G_{max} , BA обновляет действу-

ющее ограничение Q_{max} для MPC на величину текущей производительности. Результаты и эффективность САУ представлены соответственно на рис. 8.

На 1% (рис. 8, а) увеличилась средняя производительность в автоматическом режиме с MPC-DOV+BA – $240,67$ т/ч по сравнению с ПИД – $238,01$ т/ч. На рис. 8 можно видеть функционирование BA – в момент $t = 4,32$ ч при превышении G_{max} было установлено новое ограничение $Q_{max} = 243$ т/ч для регулятора MPC.

Выводы

В данной работе была представлена новая система автоматического управления заполнением шаровой мельницы с постоянной скоростью вращения, с разгрузкой через торцевую решетку в замкнутом цикле измельчения, отличающаяся совместным использованием прогнозирующего управления, наблюдателя возмущений, виртуального анализатора веса материала в мельнице для повышения производительности, устойчивости к внешним возмущениям, устойчивости работы в режиме функциональной неустойчивости.

Применение MPC-DOV при синусоидальных и ступенчатых возмущениях позволило сократить RSD на $4-7\%$ по отношению к ПИД и MPC (рис. 4-6, табл. 1-3). В сравнении с MPC без наблюдателя возмущений в [20], который позволил сократить RSD на $1-2\%$, применение MPC-DOV показывает свое преимущество.

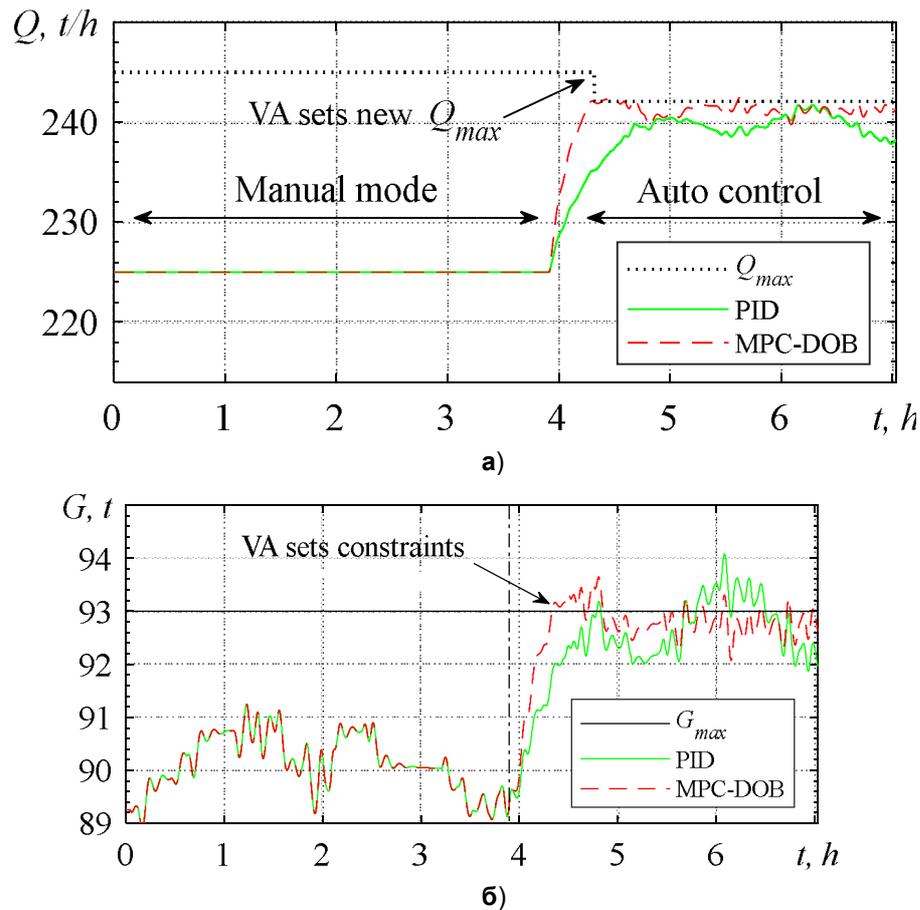


Рис. 8. Сравнение САУ с ПИД и MPC-DOB+ВА: **а** – производительность по руде; **б** – масса материала в мельнице (выход ВА)

Fig. 8. Comparison of ACS with PID and MPC-DOB+VA performance: **a** – ore productivity; **b** – weight of material in the mill (VA output)

Применение MPC-DOB+ВА позволило повысить производительность мельницы на 1 % (рис. 8, а) по сравнению с ПИД регулированием. Дополнительное применение ВА для оперативного формирования ограничений производительности по спрогнозированному значению веса материала в мельнице позволяет эксплуатировать технологи-

ческое оборудование цикла измельчения в режимах высокой производительности (рис. 8), избегая перегрузки мельницы. Предложенные модели и алгоритмы могут являться основой для внедрения усовершенствованной САУ в АСУТП обогатительных фабрик с возможностью повысить производительность передела измельчения.

Список литературы

1. Energy efficiency analysis of copper ore ball mill drive systems / P. Bortnowski, L. Gładysiewicz, R. Król, M. Ozdoba // *Energies*. 2021; 14(6): 1786-1799. <https://doi.org/10.3390/en14061786>.

2. Control strategy of cement mill based on bang-bang and fuzzy PID self-tuning / Q. Meng, Y. Wang, F. Xu, X. Shi // 2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). IEEE; 2015; 1977-1981. DOI: 10.1109/CYBER.2015.7288250.

3. Expert system based adaptive dynamic matrix control for ball mill grinding circuit / X. S. Chen, S. H. Li, J. Y. Zhai, Q. Li // Expert systems with Applications. 2009; 36(1): 716-723. DOI: 10.1016/j.eswa.2007.10.008.

4. Composite control for raymond mill based on model predictive control and disturbance observer / D. Niu, X. Chen, J. Yang, X., Wang X. Zhou // Advances in Mechanical Engineering. 2016; 8(3): 1–10. <https://doi.org/10.1177/1687814016639825>.

5. Process Control of Ball Mill Based on MPC-DO / X. Chen, J. Yang, Z. Zhong, J. Zhai // Mathematical Problems in Engineering. 2021; 2021: 1-14. <https://doi.org/10.1155/2021/9994666>.

6. Gavrilin A. N., Moyzes B. B., Cherkasov A. I. Research methods of milling technology elements // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd; 2015; 756: 35-40. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.756.35>.

7. McClure K. S., Gopaluni R. B. Overload detection in semi-autogenous grinding: a nonlinear process monitoring approach // IFAC-PapersOnLine. 2015; 48(8): 960-965. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.094>.

8. Semi-Autogenous (SAG) Mill Overload Forecasting / R. Hermosilla, C. Valle, H. Allende, E. Lucic, P. Espinoza // Iberoamerican Congress on Pattern Recognition. Springer: Cham; 2021; 392-401. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93420-0_37.

9. Zakamaldin A. A., Shilin A. A. Neural simulation of ball mill grinding process // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing; 2020; 795(1): 012010-012017. DOI:10.1088/1757-899X/795/1/012010.

10. Байзакова Г. А., Томилин А. К. Электромагнитный способ подстройки частоты вибрметра // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. 55(6-2): 244-247. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/161606946.pdf>.

11. Методика постановки эксперимента в среде CoDeSys на примере системы управления вентиляцией / С. В. Прохоров, Н. В. Выонг, А. А. Шилин, Г. И. Однокопылов, В. А. Шевчук // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2019; 22(4): 109-115. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-postanovki-eksperimenta-v-srede-codesys-na-primere-sistemy-upravleniya-ventilyatsiy>.

12. Le Roux J. D., Craig I. K. Requirements for estimating the volume of rocks and balls in a grinding mill // IFAC-PapersOnLine. 2017; 50(1): 1169-1174. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.403.

13. Faria P. M. C., Rajamani R. K., Tavares L. M. Optimization of solids concentration in iron ore ball milling through modeling and simulation // Minerals. 2019; 9(6): 366-380. <https://doi.org/10.3390/min9060366>.

14. De Oliveira A. L. R., Tavares L. M. Modeling and simulation of continuous open circuit dry grinding in a pilot-scale ball mill using Austin's and Nomura's models // *Powder technology*. 2018; 340: 77-87.

15. Liu Y., Spencer S. Dynamic simulation of grinding circuits // *Minerals Engineering*. 2004; 17(11-12): 1189-1198. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.05.018>.

16. le Roux J. D., Craig I. K. State and parameter identifiability of a non-linear grinding mill circuit model // *IFAC-PapersOnLine*. 2016; 49(20): 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.087>.

17. Закамалдин А. А., Шилин А.А. Моделирование замкнутого цикла измельчения в шаровой барабанной мельнице с разгрузкой через торцевую решетку // *Технология машиностроения*. 2021; 8: 12-20.

18. A low-cost pole-placement MPC algorithm for controlling complex dynamic systems / Z. Zhang, L. Xie, S. Lu, J. A. Rossiter, H. Su // *Journal of Process Control*. 2022. 111: 106-116. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2022.02.001>

19. Букреев В. Г., Шандарова Е. Б., Рулевский В. М. Многомерная модель системы электропитания погружного технологического оборудования // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018; 329(4): 119-131. URL: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/47202/1/bulletin_tpu-2018-v329-i4-11.pdf

20. Закамалдин А. А., Шилин А. А. Построение системы автоматического управления с прогнозирующей моделью для стабилизации плотности и уровня при перемешивании пульпы в горно-обоганительном оборудовании // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2021; 58: 77-83. DOI: 10.36807/1998-9849-2021-58-84-77-83.

References

1. Bortnowski P., Gładysiewicz L., Król R., Ozdoba M. Energy efficiency analysis of copper ore ball mill drive systems. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 6, pp. 1786-1799. <https://doi.org/10.3390/en14061786>.

2. Meng Q., Wang Y., Xu F., Shi X. Control strategy of cement mill based on bang-bang and fuzzy PID self-tuning. *2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*. IEEE, 2015, pp. 1977-1981. DOI: 10.1109/CYBER.2015.7288250.

3. Chen X. S., Li S. H., Zhai J. Y., Li Q. Expert system based adaptive dynamic matrix control for ball mill grinding circuit. *Expert systems with Applications*, 2009, vol. 36, no. 1, pp. 716-723. DOI: 10.1016/j.eswa.2007.10.008.

4. Niu D., Chen X., Yang J., Wang X., Zhou X. Composite control for raymond mill based on model predictive control and disturbance observer. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, vol. 8, no. 3, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1177/1687814016639825>.

5. Chen X., Yang J., Zhong Z., Zhai J. Process Control of Ball Mill Based on MPC-DO. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021, vol. 2021, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1155/2021/9994666>.
6. Gavrilin A. N., Moyzes B. B., Cherkasov A. I. Research methods of milling technology elements. *Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd*, 2015, vol. 756, pp. 35-40. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.756.35>.
7. McClure K. S., Gopaluni R. B. Overload detection in semi-autogenous grinding: a nonlinear process monitoring approach. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 48, no. 8, pp. 960-965. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.094>.
8. Hermosilla R., Valle C., Allende H., Lucic E., Espinoza P. Semi-Autogenous (SAG) Mill Overload Forecasting. *Iberoamerican Congress on Pattern Recognition. Springer, Cham*, 2021, pp. 392-401. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93420-0_37.
9. Zakamaldin A. A., Shilin A. A. Neural simulation of ball mill grinding process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing*, 2020, vol. 795, no. 1, pp. 012010-012017. DOI:10.1088/1757-899X/795/1/012010.
10. Bajzakova G.A., Tomilin A.K. Elektromagnitnyi sposob podstroiki chastoty vibrometra [Electromagnetic way to adjust the frequency of the vibrometer]. *Fizika = Physics*, 2012, vol. 55, no. 6-2, pp. 244-247. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/161606946.pdf>.
11. Prokhorov S. V., Vyong N. V., Shilin A. A., Odnokopylov G. I., Shevchuk V. A. Metodika postanovki eksperimenta v srede CoDeSys na primere sistemy upravleniya ventilyatsiei [Methodology for setting up an experiment in the CoDeSys environment on the example of a ventilation control system]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 109-115. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-postanovki-eksperimenta-v-srede-codesys-na-primere-sistemy-upravleniya-ventilyatsiei>.
12. Le Roux J. D., Craig I. K. Requirements for estimating the volume of rocks and balls in a grinding mill. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, vol. 50, no. 1, pp. 1169-1174. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.403.
13. Faria P. M. C., Rajamani R. K., Tavares L. M. Optimization of solids concentration in iron ore ball milling through modeling and simulation. *Minerals*, 2019, vol. 9, no. 6, pp. 366-380. <https://doi.org/10.3390/min9060366>.
14. De Oliveira A. L. R., Tavares L. M. Modeling and simulation of continuous open circuit dry grinding in a pilot-scale ball mill using Austin's and Nomura's models. *Powder technology*, 2018, vol. 340, pp. 77-87.
15. Liu Y., Spencer S. Dynamic simulation of grinding circuits. *Minerals Engineering*, 2004, vol. 17, no. 1-12, pp. 1189-1198. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.05.018>.

16. Le Roux, J. D., Craig, I. K. State and parameter identifiability of a non-linear grinding mill circuit model. *FAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49, no. 20, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.087>.

17. Zakamaldin A. A., Shilin A. A. Modelirovanie zamknutogo tsikla izmel'cheniya v sharovoi barabannoi mel'nitse s razgruzkoi cherez tortsevuyu reshetku [Simulation of a closed grinding cycle in a ball drum mill with grate discharge]. *Tekhnologiya mashinostroeniya = Engineering technology*, 2021, vol. 8, pp. 12-20 (In Russ.).

18. Zhang Z., Xie L., Lu S., Rossiter J. A., Su, H. A low-cost pole-placement MPC algorithm for controlling complex dynamic systems. *Journal of Process Control*, 2022, vol. 111, pp. 106-116. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2022.02.001>

19. Boukreev V. G., Shandarova E. B., Rulevskiy V. M. Mnogomernaya model' sistemy elektropitaniya pogruzhnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya [Multidimensional model of the power supply system for submersible processing equipment]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering*, 2018, vol. 329, no. 4, pp. 119-131. Available at: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/47202/1/bulletin_tpu-2018-v329-i4-11.pdf

20. Zakamaldin A. A., Shilin A. A. Postroenie sistemy avtomaticheskogo upravleniya s prognoziryuyushchei model'yu dlya stabilizatsii plotnosti i urovnya pri peremeshivanii pul'py v gorno-obogatitel'nom oborudovanii [Construction of an automatic control system with a predictive model for density and level stabilization during pulp mixing in mining and processing equipment]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta) = News of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*, 2021, vol. 58, pp. 77-83. <https://doi.org/10.36807/1998-9849-2021-58-84-77-83>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Закамалдин Андрей Андреевич, главный специалист, ООО "Электра +", г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: aaz5@tpu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4781-236X>

Andrei A. Zakamaldin, Chief Specialist, "Electra +" Ltd., St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: aaz5@tpu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4781-236X>

Шилин Александр Анатольевич, доктор технических наук, профессор, ОЭЭ ИШЭ НИТПУ, г. Томск, Российская Федерация, e-mail: shilin@tpu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4761-7249>

Aleksandr A. Shilin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Power Engineering School, Department of Electric Power and Electrical Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation, e-mail: shilin@tpu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4761-7249>

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-129-150>

Подход и алгоритм оценки допустимых значений отношения сигнал/шум лидаров роботов в условиях внешних воздействий

М.В. Мамченко ¹ ✉

¹ Лаборатория киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук
ул. Профсоюзная, д. 65, г. Москва 117997, Российская Федерация

✉ e-mail: markmamcha@gmail.com

Резюме

Цель исследования заключается в обеспечении безопасного функционирования робототехнических средств за счет разработки методов, подходов и алгоритмов обработки информации и описания их функционирования.

Методы. В работе предлагается подход к оценке допустимого отношения сигнал/шум (ОСШ) для лидаров роботов на основе заданной вероятности появления «ложной тревоги» в условиях непреднамеренных воздействий. В основе представленного синтезированного вероятностного подхода лежат физические основы инфракрасного излучения и байесовская теория с применением критерия Неймана-Пирсона. Особенностью предлагаемого подхода является использование в аналитическом аппарате не только заданного порога появления ложной тревоги и вероятности возникновения интерференции, но и учет характеристик фотоприемных устройств лидаров. Это позволяет аналитически рассчитать величину допустимого ОСШ при стабилизации уровня «ложных тревог» на фоне шумов, вызванных данным видом помех.

Результаты. Сформированные и представленные в работе зависимости могут использоваться в качестве одной из эксплуатационных характеристик при разработке и выборе оптоэлектронной системы измерения лидаров. Исходя из фиксированного значения «ложной тревоги» и полученного графического выражения полученной рабочей характеристики (полученных характеристик) возможно подобрать лидар с необходимыми техническими параметрами.

Заключение. Разработан вероятностный подход и соответствующий алгоритм выбора порогового значения ОСШ, основанный на сущности критерия Неймана-Пирсона. Подход позволяет минимизировать значение вероятности «игнорирования» объекта при сканировании за счет недопущения превышения вероятности «ложной тревоги» заданного порогового значения. Представлено математическое и методологическое обеспечение для проектирования лидаров с учетом априорной оценки допустимого значения ОСШ и вероятности обнаружения отраженного импульса, без учета предварительных оценок вероятностных характеристик обнаружения объектов лидаром. В представленном алгоритме на вход подается набор необработанных данных – в виде значений полученного сигнала с шумовой составляющей. Выходные данные представлены множеством зависимостей вероятности ошибок для различных пороговых значений отношения сигнал/шум.

Ключевые слова: вероятностный подход; лидар; отношение сигнал/шум; ОСШ; ложная тревога; критерий Неймана-Пирсона; помеха; внешние воздействия.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06044.

Благодарности: Автор выражает благодарность и признательность научному сотруднику лаборатории киберфизических систем ИПУ РАН Романовой Марии Андреевне за существенный вклад в подготовку и написание настоящей статьи.

Для цитирования: Мамченко М.В. Подход и алгоритм оценки допустимых значений отношения сигнал/шум лидаров роботов в условиях внешних воздействий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(3): 129-150. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-129-150>.

Поступила в редакцию 12.07.2022

Подписана в печать 29.07.2022

Опубликована 30.09.2022

Approach and Algorithm for Evaluating the Allowed Signal/Noise Ratio of Robotic Lidars under External Influences

Mark V. Mamchenko ¹ ✉

¹ Cyberphysical Systems Lab., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences
65, Profsoyuznaya str., Moscow 117997, Russian Federation

✉ e-mail: markmamcha@gmail.com

Abstract

Purpose or research. The aim of the study is to ensure the safe operation of robotics by developing methods, approaches and algorithms for information processing, and describing their functioning.

Methods. The paper proposes an approach to estimation allowed signal/noise ratio (SNR) for robotic LiDARs based on the predetermined probability of occurrence of «false alarm» under unintended influences. The synthesized probabilistic approach is based on the physical fundamentals of infrared radiation, and the Bayesian theory using the Neyman-Pearson criterion. The feature of the proposed approach is the use of the given threshold of «false alarm» occurrence, and the probability of occurrence of interference in the analytical apparatus, as well as consideration of the characteristics of photodetectors. This allows expressing analytically and calculating the value of the allowed SNR when stabilizing the level of «false alarms» against background noise caused by this type of interference.

Results. The formed and presented dependencies can be used as one of the operating characteristics in the development and selection of optoelectronic system of LiDAR's measurement system. Based on the fixed value of «false alarm», and the resulting graphical expression of the operating characteristic (obtained characteristics) it is possible to choose a LiDARs system with necessary technical parameters.

Conclusion. The probabilistic approach and the corresponding algorithm for selecting the threshold SNR value based on the Neyman-Pearson criterion were developed. The approach allows minimizing the probability of «ignoring» the object when scanning, since the probability of «false alarm» does not exceed the given threshold value. Mathematical and methodological support for the design of LiDARs is presented, taking into account a priori estimation of the allowed SNR value, and the probability of reflected pulse detection, without preliminary estimates of probabilistic characteristics of object detection. The presented algorithm has a set of raw data (in the form of the values of the received signal with a noise component) as an input. Its output is represented by a set of error probability dependencies for different SNR thresholds.

Keywords: probabilistic approach; LiDAR; signal/noise ratio; SNR; false alarm; Neyman-Pearson criterion; interference; external influences.

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

Funding: The reported study was partially funded by RFBR, number 19-29-06044.

Acknowledgement: The author expresses gratitude and appreciation to Mariya A. Romanova, researcher of Cyberphysical Systems Laboratory of ICS RAS, for the significant contribution to the preparation and writing of this article.

For citation: Mamchenko M. V. Approach and Algorithm for Evaluating the Allowed Signal/Noise Ratio of Robotic Lidars under External Influences. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(3): 129-150 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-129-150>.

Received 12.07.2022

Accepted 29.07.2022

Published 30.09.2022

Введение

Методы и подходы, используемые для противодействия преднамеренным и непреднамеренным воздействиям на лидары в основном заключаются в совершенствовании физических (использование новых конструкций лидаров, типов модуляции и оптических частот, псевдослучайной перестройки рабочей частоты и т.д.) и программных компонентов (обнаружение аномалий данных, снижение шумов, проверка целостности полученной информации, внедрение новых схем обработки облаков точек с использованием фильтров и т.д.) [1-17]. Вместе с тем, внесение изменений в аппаратные и программные составляющие лидаров для повышения их робастности являются достаточно дорогостоящим, ресурсо- и трудоемким процессом [18-22].

Уменьшение влияния различного рода помех на функционирование лидара неразрывно связано с увеличением значения отношения сигнал/шум (ОСШ) для целевого объекта. Решение задачи повышения ОСШ за счет использования соответствующих методов и подходов

также позволяет достичь цели повышения робастности и защищенности лидаров от воздействий различных помех. ОСШ на выходе фотодетектора является основным параметром, описывающим производительность под-системы приема лидара [23-26]. В свою очередь, вероятность обнаружения сигнала напрямую связана с ОСШ, выбранным пороговым значением для обнаружения отраженного сигнала и решением о наличии или отсутствии полезного входного сигнала [27, 28]. Кроме того, в исследованиях [29, 30] рассматривается возможность взаимного наведения помех несколькими лидарами, расположенными в пределах досягаемости друг друга, что ухудшает условия для выявления препятствий. Однако вероятность наступления этих событий не учитывается.

В связи с этим предложен вероятностный подход к оценке допустимого ОСШ для лидаров и вероятность обнаружения отраженного импульса основана на математической статистике и определении порога ОСШ с использованием критерия Неймана-Пирсона, поскольку он не требует априорной ин-

формации об окружающих объектах и вероятностных характеристиках обнаружения. Учитывая известное распределение ошибок, можно вывести вероятность ошибок из ОСШ, установив различные пороговые значения. Кроме того, согласно критерию Неймана-Пирсона, также можно выбрать значение порогового значения, при котором обеспечивается минимальная вероятность «пропуска» объекта при сканировании (учитывая, что «ложная тревога» также не превышает некоторого заданного значения).

Материалы и методы

Описание подхода и алгоритма

Для учета вероятности «ложной тревоги», в том числе в условиях взаимного наведения помех несколькими лидарами, предлагается вероятностный подход, для подсчета «ложных событий» или проще говоря образованных «ложных точек» при сканировании пространства с учетом гауссовского распределения помех. Описанный подход основан на известном методе определения вероятности ошибок в радиолокации.

В начале необходимо сформировать массивы состояний измерительной системы, в данном случае рассматривается лидар, при различных внешних дестабилизирующих воздействиях и при отсутствии их. Способ формирования подобных массивов:

1. Детектирование или выделение пришедшего импульса следует предста-

вить в виде совокупности всех возвратных импульсов:

$$D_{Imp} = (d_{r_j} \cap d_{disr_j}), \quad (1)$$

где D_{Imp} – сформированное множество детектируемых импульсов, $d_{r_j} \in \{d_{r_1}, d_{r_2}, \dots, d_{r_n}\}$ – сформированное множество возвратных импульсов от рассматриваемого лидара; $d_{disr_j} \in \{d_{disr_1}, d_{disr_2}, \dots, d_{disr_n}\}$ – сформированное множество импульсов от лидаров, расположенных в пределах досягаемости друг друга, а также от многократного переотражения импульсов от объектов в пространстве.

2. Сгенерировать совокупность значений для вероятности «ложных тревог»:

- пограничные условия для интерференции переотраженных импульсов лазерного излучения от рассматриваемого лидара:

$$\{d_{r_j} \in \{D_r\} | D_{interf} \cup Q, q_k \in \{Q\}\}; \quad (2)$$

- пограничные условия для детектирования (выделения) зондирующего импульса от лидаров, расположенных в пределах досягаемости друг друга:

$$\{d_{r_j} \in \{D_r\} | D_p \cup Q, q'_k \in \{Q'\}\}, \quad (3)$$

где D_r – сформированное множество возвратных импульсов от рассматриваемого лидара для соответствующего множества D_{interf} ; D_{interf} – множество значений интерференционных импульсов; D_p – множество зондирующих импульсов от лидаров, расположенных в пределах досягаемости друг друга; Q – множество способствующих факторов и

воздействий для интерференции переотраженных импульсов; Q' – множество условий для детектирования зондирующих импульсов от лидаров, расположенных в пределах досягаемости друг друга.

3. Определение переходной матрицы детектирования «ложного события»:

– для интерференции переотраженных импульсов лазерного излучения от рассматриваемого лидара:

$$\{\exists! \in \{S_{d_{rj}}\} | \sum_{j=1}^n P_{ij} = 0,05, q_k\}; \quad (4)$$

– для детектирования (выделения) зондирующего импульса от лидаров, расположенных в пределах досягаемости друг друга:

$$\{\exists! \in \{S_{d_{disrj}}\} | \sum_{j=1}^n P_{ij} = 0,05, q'_k\}, \quad (5)$$

где $S_{d_{rj}}$ – множество оценок параметров импульсов от рассматриваемого лидара, $S_{d_{disrj}}$ – множество оценок параметров импульсов от лидаров, расположенных в пределах досягаемости друг друга; P_{ij} – вероятность регистрации «ложного события» для каждого импульса лазерного излучения при определенных способствующих факторах и событиях (если вероятность правильного обнаружения возвратного импульса лазерного излучения принять 0,95, тогда вероятность «ложных событий» будет составлять 0,05).

После того, как сформированы массивы состояний измерительной системы (лидара) при различных внешних дестабилизирующих воздействиях, которые уменьшают вероятность правильного об-

наружения возвратного импульса, можно приступить к следующему шагу.

Если в общем применить простую концепцию, когда существуют два варианта события: регистрация возвратного импульса и регистрация «ложного события», и когда известны вероятности данных событий, тогда возможно применить Байесовский метод. Однако чаще всего априорная информация при локации пространства не известна, поэтому лучше использовать критерий Неймана-Пирсона. При таком подходе фиксируем значение вероятности регистрации «ложного события» (данное значение вероятности не должно превышать 0,05). Вероятность P_d правильного обнаружения измерительным устройством (лидаром) возвратного импульса от объекта на фоне гауссовского (нормального) шума рассчитывается согласно выражению:

$$P_d = \Phi(\varpi - \varpi_n), \quad (6)$$

где $\Phi(Z)$ – интегральное распределение вероятности обнаружения импульса:

$$\Phi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Z \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \quad (7)$$

Зная зависимость вероятности обнаружения возвратного импульса от ОСШ, можно определить максимальное значение шума.

Для этого введем две гипотезы.

Гипотеза 1 (H1): Принятый (обнаруженный) сигнал содержит только шум.

Гипотеза 2 (H2): Принятый сигнал не содержит шума.

Согласно описанию сформулированной бинарной задачи, связанная с

принятием решения о приеме только шума (гипотеза H1) или о приеме полезного сигнала (гипотеза H2), возможно описать вероятности появления этих событий.

Тогда вероятность появления «ложной точки» будет описываться выражением:

$$P_F = \iint_{G_0} p(\bar{z}/H1) d\bar{z}, \quad (8)$$

а вероятность обнаружения полезного сигнала (импульса):

$$P_D = \iint_{G_1} p(\bar{z}/H2) d\bar{z}, \quad (9)$$

где \bar{z} – все зафиксированные наблюдения;

$p(\bar{z}/H1)$ – плотность распределения наблюдений, относящихся к гипотезе H1;

$p(\bar{z}/H2)$ – плотность распределения наблюдений, относящихся к гипотезе H0;

Данные вероятности априорно неизвестны, поэтому возможно применить критерий Неймана-Пирсона. Для этого необходимо решить задачу на нахождение безусловного экстремума, воспользовавшись функцией Лагранжа в виде:

$$F_\lambda = \lambda P_{F_0} + \iint_{G_1} (p(\bar{z}/H2) - \lambda p(\bar{z}/H1)) d\bar{z}. \quad (10)$$

Используя тот же опыт, что и при Байесовском методе определяем критерии качества, т.е. можно определить какие точки из области наблюдений \bar{z} включить в область G_1 , чтобы F_λ была максимальна. Если подинтегральное выражение при какой-либо точке наблюдения положительно, тогда данную точку наблюдения надо включать в область G_1 . Если же подинтегральное выражение оказывается отрицательным,

то тогда данную точку из z необходимо включить в область G_0 .

Запишем условие, сформулированное выше:

$$p(\bar{z}/H1) > p(\bar{z}/H2) \rightarrow H2; \\ \Lambda = \frac{p(z/H2)}{p(\bar{z}/H1)} \begin{cases} < \lambda \rightarrow H2 \\ \leq \lambda \rightarrow H1 \end{cases} \quad (11)$$

В данном случае записан оптимальный алгоритм по критерию Неймана-Пирсона. Используя этот алгоритм мы получим максимум вероятности правильного обнаружения при фиксированной вероятности ложной тревоги:

$$\int_\lambda^\infty p(\lambda/H2) = P_{F_0}, \quad (12)$$

где P_{F_0} – фиксированное значение «ложной тревоги».

Порог вероятности ложной тревоги будет определяться:

$$P_F = P_{F_0}; \int_\lambda^\infty \omega(\lambda/H1) d\lambda = P_{F_0}. \quad (13)$$

Рассмотрим применение описанного выше алгоритма определения вероятности ложной тревоги для данных по мощности сигнала лидара. Предполагается, что лидар установлен на движущийся объект (робота), поэтому с большей вероятностью мощности отдельных сигналов распределены по закону Релея.

Математически запишем плотность распределения Релея:

$$p(\bar{z}_i | H2) = \frac{z_i}{\sigma^2(1+q)} e^{-\left(\frac{z_i^2}{2\sigma^2(1+q)}\right)}, \quad (14)$$

где $q = \frac{\sigma_{\text{signal}}}{\sigma_{\text{noise}}}$ – это значение отношения сигнал/шум;

σ – коэффициент масштаба.

Воспользуемся отношением правдоподобия, тогда совместная плотность распределения:

$$\omega(\bar{z}/H2) = \frac{\prod_{i=1}^n z_i}{\sigma^{2n(1+q)}} e^{-\frac{1}{2\sigma(1+q)} \sum_{i=1}^n z_i}. \quad (15)$$

Введем переменную:

$$T = \sum_{i=1}^n z_i^2, \quad (16)$$

где T – сумма наблюдений.

Для этой переменной плотность распределения, когда сигнал отсутствует, опишем выражением:

$$\omega(-\bar{z}/H1) = \frac{\prod_{i=1}^n z_i}{\sigma^{2n}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} T};$$

$$\Lambda = \frac{1}{(1+q)^n} e^{\frac{1}{2\sigma^2} \left(\frac{q}{1+q}\right) T}. \quad (17)$$

Так как $\left(\frac{q}{1+q}\right)$ и $(1+q)$ – величины известны, поэтому проверка гипотезы максимального обнаружения выглядит следующим образом:

$$T \begin{cases} > T_0 \rightarrow H2 \text{ (сигнал присутствует)} \\ \leq T_0 \rightarrow H1 \text{ (сигнал отсутствует)}. \end{cases} \quad (18)$$

Согласно вышенаписанному условию необходимо сумму наблюдений сравнить с порогом отношения сигнал/шум:

$$\sum_{i=1}^n z_i^2 \geq T_0. \quad (19)$$

Найти величину суммы случайных величин эта задача довольно сложная. Но можно воспользоваться допущением из теории вероятности: сумма большого числа маленьких величин распределена по нормальному закону. По известной плотности распределения «ложных точек» задаемся вероятностью определения и определяем порог значения отношения сигнал/шум.

Основные этапы предложенного подхода можно представить в виде алго-

ритма нахождения зависимости правильного обнаружения сигнала от «ложных тревог», представленного на рис. 1.

Формирование набора данных

При проведении пространственного сканирования, а также при разработке оптоэлектронных подсистем лидаров для математического представления входной мощности принимаемого лазерного сигнала, коэффициента ослабления $a(\lambda, r)$ и коэффициента обратного рассеяния $\beta(\lambda, r)$ воспользуемся формулами из статьи [31]:

$$P_r(\lambda, r) = \eta_{\text{all}} \eta_g(r) P_0 \left[\frac{c\tau}{2} \right] \frac{A_{\text{tel}}}{r^2} \times$$

$$\times \beta(\lambda, r) e^{-2 \int_0^r \alpha(\lambda, r) dr} + P_{\text{bg}}, \quad (20)$$

$$\beta(\lambda, r) = \beta_a(\lambda, r) + \beta_m(\lambda, r);$$

$$\alpha(\lambda, r) = \alpha_a(\lambda, r) + \alpha_m(\lambda, r), \quad (21)$$

где P_0 – пиковая мощность импульса лазера;

r – дальность, с которой принимается сигнал;

λ – длина волны лазера;

η_{all} – общая эффективность лидара;

c – скорость света;

τ – длительность лазерного импульса;

$\eta_q(r)$ – геометрический фактор ($\max f_0(\eta_q(r)) = 1$);

A_{tel} – площадь приемного телескопа;

P_{bq} – мощность фонового сигнала.

a и m – индексы, которые определяют аэрозольную и молекулярную компоненты соответственно.

Алгоритм 1. Нахождение зависимости правильного обнаружения сигнала от «ложных тревог»

Входные данные: (1) количество наблюдений n ;
 (2) вектор наблюдений $\bar{z}\{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ // $\bar{z} \in G$ ($\bar{z}/G_0 \in G_0$; $\bar{z}/G_1 \in G_1$); $G_0 + G_1 = G$;
 // Априорные вероятности этих n наблюдений неизвестны.

Выходные данные: рабочая характеристика $P_D(P_F)$, т.е. зависимость правильного обнаружения сигнала от «ложных тревог» с заданными значениями ОСШ для $P_{F_0} = const = \varepsilon$

$H_2 = 1$ // гипотеза о приеме полезного сигнала
 $H_1 = 0$ // гипотеза о приеме шума
 $P_D \in p(\bar{z}/H_2) \rightarrow H_2$
 $P_F \in p(\bar{z}/H_1) \rightarrow H_1$

$$P_F = \iint_{G_0} p(\bar{z}/H_1) d\bar{z}$$

$$P_D = \iint_{G_1} p(\bar{z}/H_2) d\bar{z}$$

если $P_F + P_D = 1$, тогда
 $P_{FH_2} = \alpha$ // вероятность ошибки I рода ($p(\bar{z}/H_1) \rightarrow H_2$)
 $P_{DH_1} = \beta$ // вероятность ошибки II рода ($p(\bar{z}/H_2) \rightarrow H_1$)
 конец_если

если $\alpha = \varepsilon = P_{F_0}$, тогда
 $\beta \rightarrow \min$
 конец_если

$$\int_{\lambda}^{\infty} p(\Lambda / H_2) d\Lambda \leq \alpha$$

$$\alpha = p(\bar{z}/H_2)$$

$$\varepsilon = P_{F_0} = \int_{\lambda}^{\infty} p(\lambda / H_2)$$

найти λ
 $\Lambda = \frac{p(z/H_2)}{p(\bar{z}/H_1)} \begin{cases} < \lambda \rightarrow H_2 \\ \leq \lambda \rightarrow H_1 \end{cases}$
 $q = \text{ОСШ}$

$$\sigma^2 = \frac{\sum (z_i - \bar{z})^2}{n}$$

найти $p(\bar{z}/H_2) = \frac{z_i}{\sigma^2(1+q)} e^{-\left(\frac{z_i^2}{2\sigma^2(1+q)}\right)}$ // Распределение Рэлея
 нарисовать_график $P_D(P_F)$ при $p_{F_0} = const = \varepsilon$; $q \in \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$
 конец

Рис. 1. Алгоритм нахождения зависимости правильного обнаружения сигнала от «ложных тревог»

Fig. 1. Algorithm for finding the dependence of correct signal detection from «false alarms»

Переменные в данном уравнении зависят как от технических характеристик самой подсистемы, так и от физических свойств окружающего пространства и характеристик зондирующего импульса. Известно, что с увеличением

расстояния от объекта излучения, происходит рассеяние полезного сигнала и значительно уменьшается мощность уже прошедшего импульса на вход оптоэлектронной подсистемы. В этом случае довольно сложно выделить ве-

личину полезного импульса от общего шума. Но существует и другая проблема, возникающая при интерференции рассеянных импульсов, которая может привести к двум исходам: увеличению мощности импульса (за счет наложения волн) или полное угасание импульсов. Указанные ошибки являются непреднамеренными и должны также учитываться при задании порогового значения отношения сигнал/шум.

Сгенерируем статистические данные по мощности импульсов сигнала на основании приведенных ниже уравнений [32]:

$$P(r) = \frac{\chi P_0 A}{r^2} \frac{c\tau}{2} \beta(\lambda, r) T_1(r) T_2(r) \frac{\varphi_1}{\varphi_2}, \quad (22)$$

где χ – коэффициент оптических потерь;

r – расстояние до зондируемого объекта;

P_0 – начальная мощность импульса;

A – апертура приемника;

T – длительность импульса;

$T_1(r)$ – прозрачность атмосферы на пути от источника до зондируемого импульса;

$T_2(r)$ – прозрачность атмосферы для обратного сигнала на его частоте;

φ_1 – частота источника сигнала;

φ_2 – частота обратного сигнала.

Представим сгенерированные данные в виде графиков и гистограмм на рис. 2 и 3 соответственно.

Результаты наблюдений при измерении скалярной компоненты представляют выборку из N величин: $p_1, p_2, p_3, \dots, p_N$, распределенных по закону, приближенному к Релею. По обеим гипотезам H_1 и H_2 измеряемые величины p_i – независимые, одинаково распределенные случайные величины с нулевыми средними. По гипотезе H_1 , каждая из величин имеет дисперсию σ_{01} , а по гипотезе H_2 , – дисперсию σ_{12} .

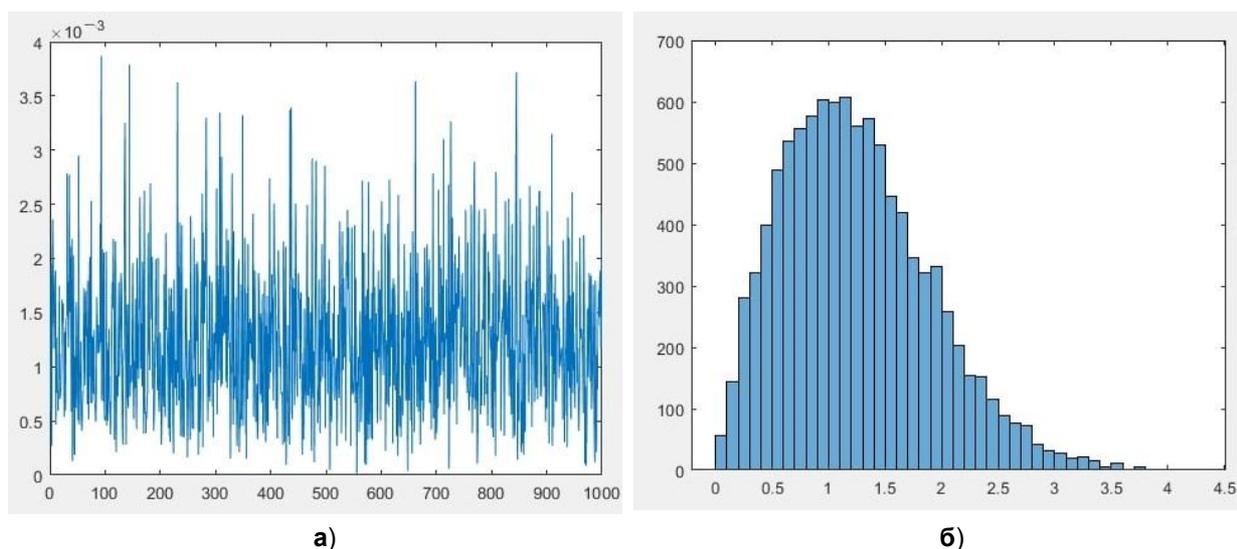


Рис. 2. Сгенерированные данные по мощности для гипотезы H_2 : **а** – данные мощности для $N=1000$; **б** – гистограмма данных наблюдений

Fig. 2. Generated power data for H_2 hypothesis: **a** – power data for $N=1000$; **b** – histogram of observed data

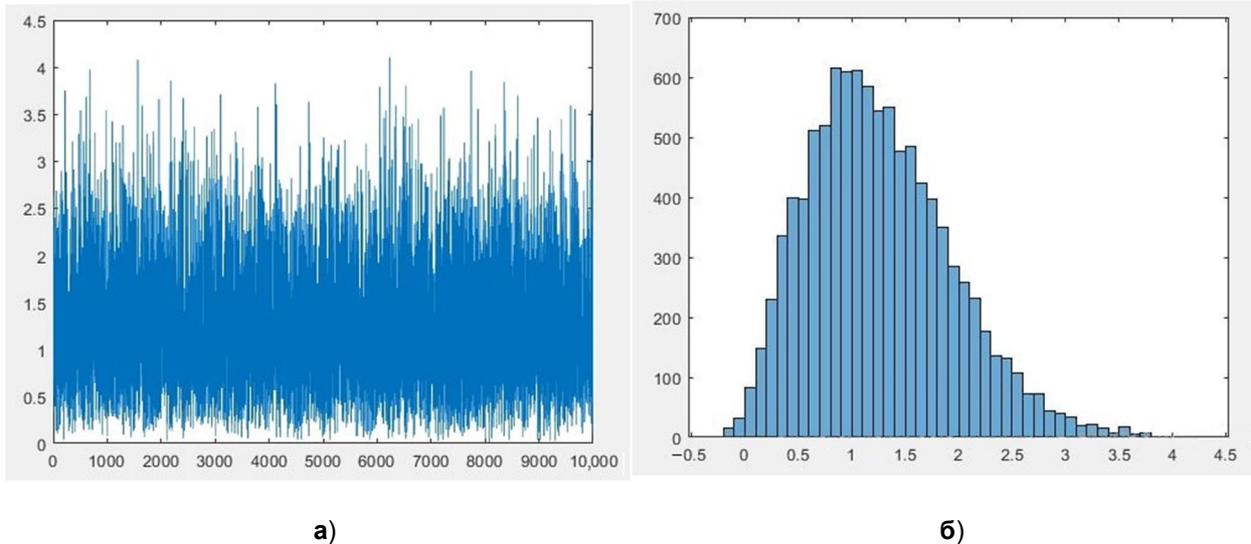


Рис. 3. Сгенерированные данные мощности для гипотезы H1 (с шумовой составляющей для дальнейшего ее выделения): **а** – данные мощности для N=1000 с шумовой составляющей; **б** – гистограмма данных наблюдений

Fig. 3. Generated power data for H1 hypothesis (with a noise component for further isolation): **a** – power data for N=1000 with a noise component; **b** – histogram of observed data

Построение графика зависимости рабочих характеристик лидара от выбранного ОСШ

Для цифровых оптоэлектронных систем существуют два основных метода приема информационных оптических сигналов (импульсов) фотоприемными устройствами: прямое фотодетектирование и гетеродинное фотодетектирование [33]. Отклик на пришедший импульс обуславливает возникновение определенной силы тока. В связи с этим, необходимо в пороговое значение отношения сигнал/шум внести третий показатель – дисперсию шумовой составляющей фотоприемника. Таким образом, пороговое значение отношения сигнал/шум будет рассчитываться по формуле

$$\varpi = \frac{\sigma_{01}^2}{\sqrt{\sigma_{12}^2 + \sigma_{nf}^2}}. \quad (23)$$

Оптимальный порог вероятности появления «ложной тревоги» приближенно равен [33]:

$$P_F \approx 0.5 \cdot [1 - \Phi(\varpi/\sqrt{2})], \quad (24)$$

где $\Phi(z)$ – функция ошибок, вычисляемая по формуле

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx. \quad (25)$$

На основании предложенной формулы (24) можно построить зависимость вероятности ошибки для разных пороговых значений отношения сигнал/шум. При этом зададим интервал вероятности появления ошибки схожим, что принимают в радиолокации от 10^{-6} до 10^{-3} (рис. 4).

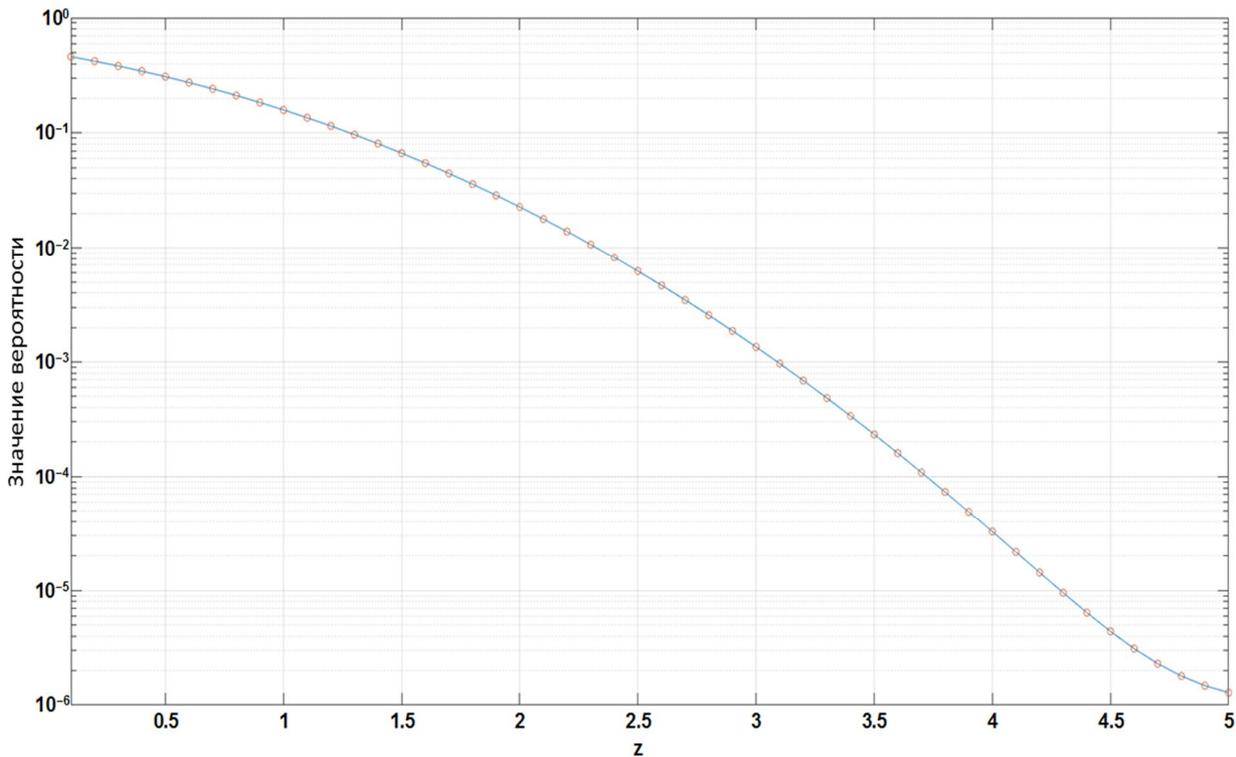


Рис. 4. Зависимость вероятности ошибки от порога значений отношения сигнал/шум

Fig. 4. The dependence of error probability on the threshold values of SNR

Однако эта зависимость построена только для одного значения ОСШ ($\varpi = 3$). Для построения множества таких зависимостей и обеспечить при этом значение методической ошибки моделирования $\delta_m = 10\%$ необходимо выполнить не менее $M = 10^8$ итераций обработки данных, с количеством наблюдений не менее $N = 100$ для каждой итерации. Требуемое количество итераций можно рассчитать следующим образом:

$$\frac{\sigma_\varepsilon}{P_{F0}} = \frac{\sqrt{1 - P_{F0}}}{\sqrt{MP_{F0}}}, \quad (26)$$

где $\frac{\sigma_\varepsilon}{P_{F0}} = \delta_m$ – относительная методическая ошибка, поэтому если $P_{F0} = 10^{-4}$, тогда $M \geq 10^8$.

Результаты и их обсуждение

Пример расчета принятой оптической мощности фотодетекторов лидара на основе выбранного порога ОСШ

Для проведения исследований с получением количественных значений перед разработчиками стоит задача найти некий компромисс между учетом инструментальных параметров и факторов внешней среды. Однако, как уже и говорилось ранее в статье, остается неясным, насколько каждый параметр подсистемы лидара и параметр окружающей среды могут количественно повлиять на конечные характеристики. В связи с этим, требуется изучить и провести оценку отношения сигнал/шум на вы-

ходе приемной подсистемы, состоящей из фотодетекторов. Указанная оценка является интегральным критерием эффективности.

Наиболее широко сегодня используются лидары, работающие в диапазоне длин волн, приближенных к 905 нм. В связи с этим, были рассмотрены типы фотодетекторов, у которых максимум чувствительности приходится на данную длину волны.

В качестве апробации были рассмотрены технические характеристики фотодетекторов одного из лидеров в производстве лидаров – компании «Velodyne». Эта фирма при изготовлении лидаров использует линейку фотодетекторов фирмы «First Sensor». Для сравнения также были взяты фотодетекторы, производимые фирмой «Hamamatsu» со схожими характеристиками. Ниже в табл. 1 приведены основные технические ха-

рактеристики фотодетекторов, разрабатываемых фирмами «First Sensor» и «Hamamatsu» (при $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Отношение мощности шумовой составляющей (интерференционного наложения) к мощности полученного сигнала составляет $\approx 1/10$, исходя из этого ОСШ будет в диапазоне 20–40 дБ [34]. Если перед разработчиком стоит задача обеспечить вероятность «ложной тревоги» 10^{-3} , и отношение сигнал/шум задано 30дБ, необходимо рассчитать принятую оптическую мощность приемного устройства лидара с вероятностью правильного обнаружения сигнала не ниже 0,95. Рассчитаем по формуле (22) мощность оптического сигнала исходя из приведенных технических характеристик в табл. 1. Смоделированные данные представлены на рис. 5 и 6 для двух различных сред с коэффициентами оптических потерь $\chi_1 = 0,1$ и $\chi_2 = 0,8$.

Таблица 1. Основные оптико-электронные характеристики

Table 1. Main optoelectronic characteristics

Параметр, единица измерения / Parameter, unit of measurement	Значение параметра для фотодетектора / The value of the parameter for the photodetector			
	«First Sensor»			«Hamamatsu»
	AD230-9 SMD и AD230-9 TO	AD500-9 SMD	AD500-9-400M TO5	S13773 и S15193
Активная площадь детектора, мм ²	0,04	0,196	0,196	0,5
Чувствительность, А/Вт	52; 58; 60 (три режима)			54; 64 (два режима)
Квантовая эффективность, %	80	80	80	80
Максимальный постоянный ток, мА	0,25	0,25	0,63	0,1; 0,3 (два режима)
Темновой ток, нА	0,5	0,8	0,8	10

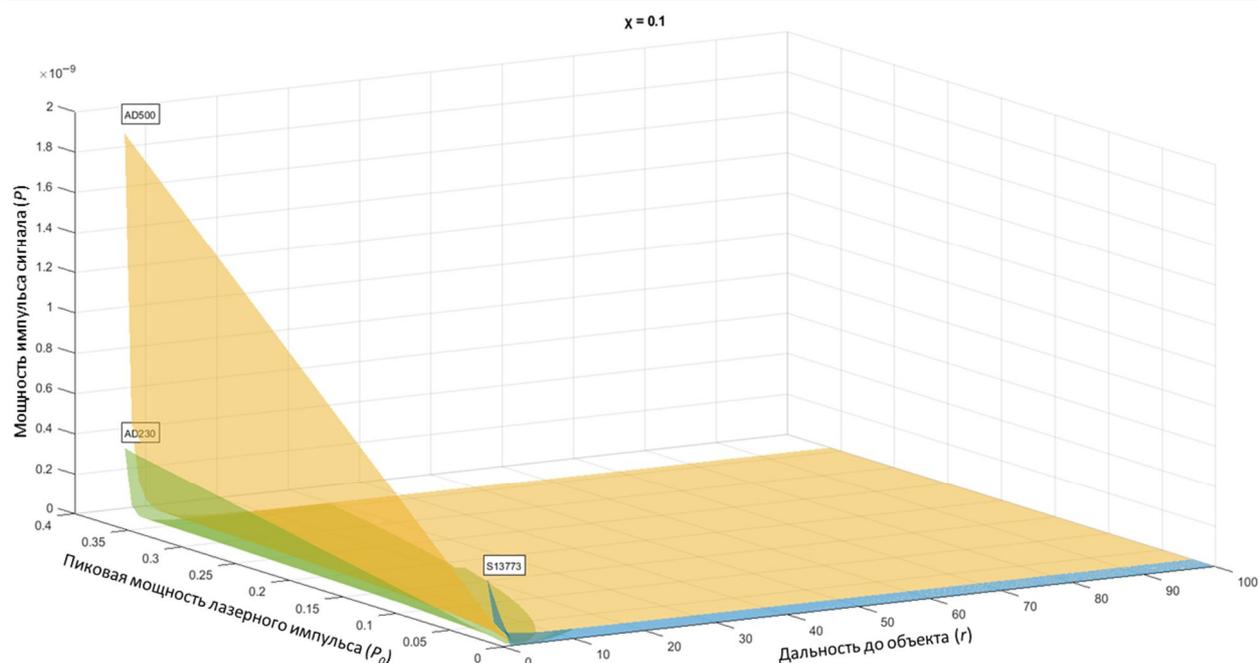


Рис. 5. Зависимости принятой оптической мощности от расстояния и импульсной мощности лидара для трех видов детекторов (AD500, AD230 и S13773) в среде с коэффициентом оптических потерь $\chi_1 = 0,1$

Fig. 5. The dependence of the received optical power on the distance, and the pulse power of the LiDAR for three types of detectors (AD500, AD230, and S13773) in the media with $\chi_1 = 0.1$ optical loss factor

Полученные результаты моделирования показывают зависимость полученной оптической мощности от расстояния до объекта с учетом пиковой мощности передатчика лидара. В этом случае графическое представление основных параметров приемного устройства позволяет упростить принятие решения по выбору типа фотодетектора для конкретного лидара.

На рис. 5 и 6 видно, что вершины полученных оптических мощностей отличны по высоте для разных типов фотодетекторов. Это свидетельствует о том, что суммарно малые изменения характеристик вносят ощутимый вклад в общую составляющую основного пара-

метра – полученная оптическая мощность. Большое отличие в значениях по мощности имеет тип фотодетектора AD500-9 SMD, соответственно данного типа выделить полезный сигнал на фоне шумов будет проще.

Приведенный расчет полученной оптической мощности дополняет ход действий при использовании подхода, описанного в статье. Ведь исходя из фиксированного значения «ложной тревоги» и полученного графического выражения рабочей характеристики (на рис. 4) становится возможно подобрать лидар с необходимыми техническими параметрами [35].

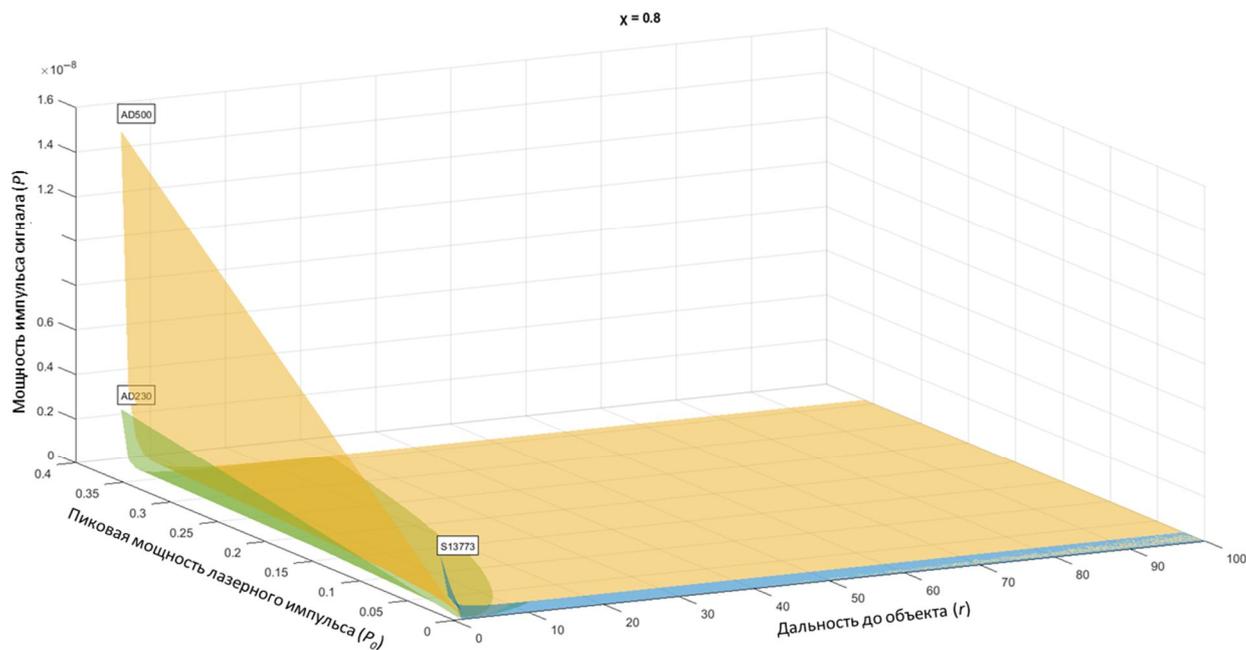


Рис. 6. Зависимости принятой оптической мощности от расстояния и импульсной мощности лидара для трех видов детекторов (AD500, AD230 и S13773) в среде с коэффициентом оптических потерь $\chi_2 = 0,8$

Fig. 6. The dependence of the received optical power on the distance, and the pulse power of the LiDAR for three types of detectors (AD500, AD230, and S13773) in the media with $\chi_2 = 0.8$ optical loss factor

Обсуждение

Сформированные и представленные в работе зависимости могут использоваться в качестве одной из эксплуатационных характеристик при разработке и выборе оптоэлектронной подсистемы измерения лидаров. На графике зависимости некоторой рабочей характеристики фотодетектора выбирается ряд значений, соответствующих фиксированным пороговым значениям. Тип этой характеристики будет определяться моделью импульсной передачи мощности в пространстве, уровнем шума и помех, техническими характеристиками лидара, наличием случайных составляющих в обнаруженном сигнале и т.д. Данная эксплуатационная характери-

стика позволяет определить вероятность правильного обнаружения и «ложной тревоги» в зависимости от выбранного критерия оптимальности. В настоящей работе рассмотрена одна эксплуатационная характеристика, в то время как на практике для правильного выбора режима работы лидара необходимо формировать набор схожих характеристик для различных пороговых значений ОСШ. Использование множества характеристик важно тем, что в случае наличия только одной характеристики неправильный выбор области наблюдения с тем же значением вероятности «ложной тревоги» может привести к значительному снижению вероятности правильного обнаружения лидара.

При проведении расчетов предполагается, что приходит полезный сигнал совместно с интерференционной составляющей (шумовая составляющая). Отношение сигнал/шум на входе оптоэлектронной подсистемы (по мощности) находится в диапазоне от 10^{-6} до 10^{-4} . В соответствии со статистическими характеристиками сигналов выполнялось моделирование выходного и входного сигнала для определенной выборки N . Для построения гистограммы, аппроксимирующей плотность вероятности выходных процессов, расчет повторялся 1000 раз для двух гипотез: когда на входе присутствует только шум (гипотеза H_1) и когда принимается полезный сигнал от локального источника (гипотеза H_2). Полученные гистограммы, аппроксимирующие плотность вероятностей при приеме шума и при приеме полезного сигнала на фоне шума, позволили рассчитать вероятность ложной тревоги и вероятность правильного обнаружения. Согласно критерию Неймана–Пирсона выбирается такое правило обнаружения, которое обеспечивает минимальную величину пропуска объекта (максимальную вероятность правильного обнаружения) при условии, что вероятность ложной тревоги не превышает заданной величины.

Вместе с тем, предложенный подход обладает рядом недостатков, присущих в силу соответствующих ограничений применимости:

– не учитывается качество облака точек, а стабилизируется значение ве-

роятности появления ложной тревоги по отношению к максимальной вероятности правильного срабатывания. Вероятность появления ложного события в каждый момент времени не известна, поэтому возможно применение критерия Неймана–Пирсона при построении выбора решения;

– составные элементы (источники) неопределенности от различных подсистем лидара не выявлялись и не описывались; вместо этого была представлена только оценка общей составляющей ошибки;

– количественно ошибки, возникающие из-за шумовых составляющих окружающей среды, по отдельности не учитывались; вместо этого учитывался их общий вклад в фоновую ошибку.

– при апробации данного подхода были взяты идеализированные параметры окружающей среды (нормальные условия эксплуатации лидара) и не учитывались фоновые изменения окружающей среды.

В дальнейших исследованиях предполагается совершенствование представленного подхода за счет учета фонового шума, возникающего из-за солнечного излучения в ясную погоду, а также учет других распределений шума при условии наличия аналитического выражения для установленного распределения вероятности «ложной тревоги».

Выводы

Разработан вероятностный подход и соответствующий алгоритм выбора

порогового значения ОСШ, основанный на сущности критерия Неймана-Пирсона. Подход позволяет минимизировать значение вероятности «игнорирования» объекта при сканировании за счет недопущения превышения вероятности «ложной тревоги» заданного порогового значения. Представлено математическое и методологическое обеспечение для проектирования лидаров с учетом априорной оценки допустимого значения ОСШ и вероятности обнаружения отраженного импульса, без учета предварительных оценок вероятностных характеристик обнаружения объек-

тов лидаром. Математическое описание шумовой составляющей фотодетектора рассматривает непреднамеренное влияние как ошибку, вызванную интерференцией. Стоит отметить, что предлагаемый подход учитывает только функцию плотности шума в соответствии с распределением Рэлея. В представленном алгоритме на вход подается набор необработанных данных – в виде значений полученного сигнала с шумовой составляющей. Выходные данные представлены множеством зависимостей вероятности ошибок для различных пороговых значений отношения сигнал/шум.

Список литературы

1. Heinzler R., Schindler P., Seekircher J., Ritter W., Stork W. Weather Influence and Classification with Automotive Lidar Sensors. *Proceedings of the 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. 2019; 1527–1534. <https://doi.org/10.1109/IVS.2019.8814205>.
2. Lin S.-L., Wu B.-H. Application of Kalman Filter to Improve 3D LiDAR Signals of Autonomous Vehicles in Adverse Weather. *Applied Sciences*. 2021; 11(7:3018): 1–16. <https://doi.org/10.3390/app11073018>.
3. Charron N., Phillips S., Waslander S.L. De-noising of Lidar Point Clouds Corrupted by Snowfall. *Proceedings of the 2018 15th Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*. 2018; 254–261. <https://doi.org/10.1109/CRV.2018.00043>.
4. Chandalvala R., Malik H. LiDAR Data Integrity Verification for Autonomous Vehicle. *IEEE Access*. 2019; 7: 138018–138031. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2943207>.
5. Shin H., Kim D., Kwon Y., Kim Y. Illusion and Dazzle: Adversarial Optical Channel Exploits against Lidars for Automotive Applications. *Lecture Notes in Computer Science*. 2017; 10529: 445–467. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66787-4_22.
6. Hwang I.-P., Yun S.-j., Lee C.-H. Study on the Frequency-Modulated Continuous-Wave LiDAR Mutual Interference. *Proceedings of the 2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT)*. 2019; 1053–1056. <https://doi.org/10.1109/ICCT46805.2019.8947067>.
7. Godbaz J.P., Dorrington A.A., Cree M.J. Understanding and Ameliorating Mixed Pixels and Multipath Interference in AMCW Lidar. *TOF Range-Imaging Cameras*. 2013; 91–116. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27523-4_5.

8. Kim G., Eom J., Hur S., Park Y. Analysis on the characteristics of mutual interference between pulsed terrestrial LIDAR scanners. *Proceedings of the 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2015; 2151–2154. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326229>.

9. Kim G., Eom J., Park S., Park Y. Occurrence and characteristics of mutual interference between LIDAR scanners. *Photon Counting Applications. Proceedings*. 2015; 9504: 1–9. <https://doi.org/10.1117/12.2178502>.

10. Kim G., Eom J., Park Y. Investigation on the occurrence of mutual interference between pulsed terrestrial LIDAR scanners. *Proceedings of the 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. 2015; 437–442. <https://doi.org/10.1109/IVS.2015.7225724>.

11. Eom J., Kim G., Hur S., Park Y. Assessment of Mutual Interference Potential and Impact with off-the-Shelf Mobile LIDAR. *Advanced Photonics 2018 (BGPP, IPR, NP, NOMA, Sensors, Networks, SPPCom, SOF)*. 2018; (JTU2A.66): 1–14. <https://doi.org/10.1364/BGPPM.2018.JTU2A.66>.

12. Park Y., Kim G., Eom J. Design of pulsed scanning lidar without mutual interferences. *Smart Photonic and Optoelectronic Integrated Circuits XX. Proceedings*. 2018; 10536: 1–6. <https://doi.org/10.1117/12.2288740>.

13. Popko G.B., Gaylord T.K., Valenta C.R. Geometric approximation model of inter-lidar interference. *Optical Engineering*. 2020; 59(3:033104): 1–21. <https://doi.org/10.1117/1.OE.59.3.033104>.

14. Zhang F., Du P., Liu Q., Gong M., Fu X. Adaptive strategy for CPPM single-photon collision avoidance LIDAR against dynamic crosstalk. *Optics Express*. 2017; 25(11): 12237–12250. <https://doi.org/10.1364/OE.25.012237>.

15. Diehm A.L., Hammer M., Hebel M., Arens M. Mitigation of crosstalk effects in multi-LiDAR configurations. *Electro-Optical Remote Sensing XII. Proceedings*. 2018; 10796(1079604): 1–12. <https://doi.org/10.1117/12.2324305>.

16. Wu J., Xu H., Tian Y., Pi R., Yue R. Vehicle Detection under Adverse Weather from Roadside LiDAR Data. *Sensors*. 2020; 20(12:3433): 1–17. <https://doi.org/10.3390/s20123433>.

17. Kutila M., Pyykönen P., Ritter W., Sawade O., Schäufele B. Automotive LIDAR sensor development scenarios for harsh weather conditions. *Proceedings of the 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 2016; 265–270. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2016.7795565>.

18. Jokela M., Pyykönen P., Kutila M., Kauvo K. LiDAR Performance Review in Arctic Conditions. *Proceedings of the 2019 IEEE 15th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*. 2019; 27–31. <https://doi.org/10.1109/ICCP48234.2019.8959554>.

19. Park J.-I., Park J., Kim K.-S. Fast and Accurate Desnowing Algorithm for LiDAR Point Clouds. *IEEE Access*. 2020; 8: 160202–160212. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3020266>.

20. Ronen A., Agassi E., Yaron O. Sensing with Polarized LIDAR in Degraded Visibility Conditions Due to Fog and Low Clouds. *Sensors*. 2021; 21(7:2510): 1–13. <https://doi.org/10.3390/s21072510>.
21. Vargas Rivero J.R., Gerbich T., Buschardt B., Chen J. Data Augmentation of Automotive LIDAR Point Clouds under Adverse Weather Situations. *Sensors*. 2021; 21(13:4503): 1–16. <https://doi.org/10.3390/s21134503>.
22. Chen Y., Xie Y., Liu C., Chen L. Investigation of Anti-Interference Characteristics of Frequency-Hopping LiDAR. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2021; 33(24): 1443–1446. <https://doi.org/10.1109/LPT.2021.3125702>.
23. Yu M., Shi M., Hu W., Yi L. FPGA-Based Dual-Pulse Anti-Interference Lidar System Using Digital Chaotic Pulse Position Modulation. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2021; 33(15): 757–760. <https://doi.org/10.1109/LPT.2021.3093109>.
24. Seo H., Cho G., Kim J., Bae J., Kim S.-J., Chun J.-H., Choi J. A CMOS LiDAR Sensor with Pre-Post Weighted-Histogramming for Sunlight Immunity over 105 klx and SPAD-based Infinite Interference Canceling. *Proceedings of the 2021 Symposium on VLSI Circuits*. 2021; 1–2. <https://doi.org/10.23919/VLSICircuits52068.2021.9492328>.
25. Tsai C.-M., Liu Y.C. Anti-Interference Single-Photon LiDAR Using Stochastic Pulse Position Modulation. *Optics Letters*. 2020; 45(2): 439–442. <https://doi.org/10.1364/OL.384894>.
26. Ishizaki Y., Zhang C., Set S.Y., Yamashita S. A Novel Software-Based Optical Sampling Scheme for High-Precision and Interference-Free Time-of-Flight LiDAR. *Proceedings of the 2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. 2020; 1–2.
27. Fersch T., Weigel R., Koelpin A. A CDMA Modulation Technique for Automotive Time-of-Flight LiDAR Systems. *IEEE Sensors Journal*. 2017; 17(11): 3507–3516. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2688126>.
28. Cheng C.-H., Chen C.-Y., Chen J.-D., Pan D.-K., Ting K.-T., Lin F.-Y. 3D pulsed chaos lidar system. *Optics Express*. 2018; 26(9): 12230–12241. <https://doi.org/10.1364/OE.26.012230>.
29. Matsumura R., Sugawara T., Sakiyama K. A Secure LIDAR with AES-based Side-Channel Fingerprinting. *2018 Sixth International Symposium on Computing and Networking Workshops (CANDARW)*. 2018; 479–482. <https://doi.org/10.1109/CANDARW.2018.00092>.
30. Takefuji Y. Connected Vehicle Security Vulnerabilities [Commentary]. *IEEE Technology and Society Magazine*. 2018; 37(1): 15–18. <https://doi.org/10.1109/MTS.2018.2795093>.
31. Boreysho A.S., Kim A.A., Konyaev M.A., Luginya V.S., Morozov A.V., Orlov A.E. Modern Lidar Systems for Atmosphere Remote Sensing. *PHOTONICS RUSSIA*. 2019; 7(13): 648–657. <https://doi.org/10.22184/1992-7296.FRos.2019.13.7.648.657>
32. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987.

33. Салех Б., Тейх М. Оптика и фотоника. Принципы и применения: в 2 т. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2012. Т. 2.
34. Hwang I.-P., Lee C.-H. Mutual Interferences of a True-Random LiDAR with Other LiDAR Signals. *IEEE Access*. 2020; 8: 124123–124133. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3004891>.
35. Meshcheryakov R., Iskhakov A., Mamchenko M., Romanova M., Uvaysov S., Amirgaliyev Y., Gromaszek K. A Probabilistic Approach to Estimating Allowed SNR Values for Automotive LiDARs in “Smart Cities” under Various External Influences. *Sensors*. 2022; 22(2:609): 1–31. <https://doi.org/10.3390/s22020609>.

References

1. Heinzler R., Schindler P., Seekircher J., Ritter W., Stork W. Weather Influence and Classification with Automotive Lidar Sensors. *Proceedings of the 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. 2019; 1527–1534. <https://doi.org/10.1109/IVS.2019.8814205>.
2. Lin S.-L., Wu B.-H. Application of Kalman Filter to Improve 3D LiDAR Signals of Autonomous Vehicles in Adverse Weather. *Applied Sciences*. 2021; 11(7:3018): 1–16. <https://doi.org/10.3390/app11073018>.
3. Charron N., Phillips S., Waslander S.L. De-noising of Lidar Point Clouds Corrupted by Snowfall. *Proceedings of the 2018 15th Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*. 2018; 254–261. <https://doi.org/10.1109/CRV.2018.00043>.
4. Changalvala R., Malik H. LiDAR Data Integrity Verification for Autonomous Vehicle. *IEEE Access*. 2019; 7: 138018–138031. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2943207>.
5. Shin H., Kim D., Kwon Y., Kim Y. Illusion and Dazzle: Adversarial Optical Channel Exploits against Lidars for Automotive Applications. *Lecture Notes in Computer Science*. 2017; 10529: 445–467. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66787-4_22.
6. Hwang I.-P., Yun S.-j., Lee C.-H. Study on the Frequency-Modulated Continuous-Wave LiDAR Mutual Interference. *Proceedings of the 2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT)*. 2019; 1053–1056. <https://doi.org/10.1109/ICCT46805.2019.8947067>.
7. Godbaz J.P., Dorrington A.A., Cree M.J. Understanding and Ameliorating Mixed Pixels and Multipath Interference in AMCW Lidar. *TOF Range-Imaging Cameras*. 2013; 91–116. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27523-4_5.
8. Kim G., Eom J., Hur S., Park Y. Analysis on the characteristics of mutual interference between pulsed terrestrial LIDAR scanners. *Proceedings of the 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2015; 2151–2154. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326229>.

9. Kim G., Eom J., Park S., Park Y. Occurrence and characteristics of mutual interference between LIDAR scanners. *Photon Counting Applications. Proceedings*. 2015; 9504: 1–9. <https://doi.org/10.1117/12.2178502>.
10. Kim G., Eom J., Park Y. Investigation on the occurrence of mutual interference between pulsed terrestrial LIDAR scanners. *Proceedings of the 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. 2015; 437–442. <https://doi.org/10.1109/IVS.2015.7225724>.
11. Eom J., Kim G., Hur S., Park Y. Assessment of Mutual Interference Potential and Impact with off-the-Shelf Mobile LIDAR. *Advanced Photonics 2018 (BGPP, IPR, NP, NOMA, Sensors, Networks, SPCom, SOF)*. 2018; (JTU2A.66): 1–14. <https://doi.org/10.1364/BGPPM.2018.JTU2A.66>.
12. Park Y., Kim G., Eom J. Design of pulsed scanning lidar without mutual interferences. *Smart Photonic and Optoelectronic Integrated Circuits XX. Proceedings*. 2018; 10536: 1–6. <https://doi.org/10.1117/12.2288740>.
13. Popko G.B., Gaylord T.K., Valenta C.R. Geometric approximation model of inter-lidar interference. *Optical Engineering*. 2020; 59(3:033104): 1–21. <https://doi.org/10.1117/1.OE.59.3.033104>.
14. Zhang F., Du P., Liu Q., Gong M., Fu X. Adaptive strategy for CPPM single-photon collision avoidance LIDAR against dynamic crosstalk. *Optics Express*. 2017; 25(11): 12237–12250. <https://doi.org/10.1364/OE.25.012237>.
15. Diehm A.L., Hammer M., Hebel M., Arens M. Mitigation of crosstalk effects in multi-LiDAR configurations. *Electro-Optical Remote Sensing XII. Proceedings*. 2018; 10796(1079604): 1–12. <https://doi.org/10.1117/12.2324305>.
16. Wu J., Xu H., Tian Y., Pi R., Yue R. Vehicle Detection under Adverse Weather from Roadside LiDAR Data. *Sensors*. 2020; 20(12:3433): 1–17. <https://doi.org/10.3390/s20123433>.
17. Kutila M., Pyykönen P., Ritter W., Sawade O., Schäufele B. Automotive LIDAR sensor development scenarios for harsh weather conditions. *Proceedings of the 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 2016; 265–270. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2016.7795565>.
18. Jokela M., Pyykönen P., Kutila M., Kauvo K. LiDAR Performance Review in Arctic Conditions. *Proceedings of the 2019 IEEE 15th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*. 2019; 27–31. <https://doi.org/10.1109/ICCP48234.2019.8959554>.
19. Park J.-I., Park J., Kim K.-S. Fast and Accurate Desnowing Algorithm for LiDAR Point Clouds. *IEEE Access*. 2020; 8: 160202–160212. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3020266>.
20. Ronen A., Agassi E., Yaron O. Sensing with Polarized LIDAR in Degraded Visibility Conditions Due to Fog and Low Clouds. *Sensors*. 2021; 21(7:2510): 1–13. <https://doi.org/10.3390/s21072510>.

21. Vargas Rivero J.R., Gerbich T., Buschardt B., Chen J. Data Augmentation of Automotive LiDAR Point Clouds under Adverse Weather Situations. *Sensors*. 2021; 21(13:4503): 1–16. <https://doi.org/10.3390/s21134503>.
22. Chen Y., Xie Y., Liu C., Chen L. Investigation of Anti-Interference Characteristics of Frequency-Hopping LiDAR. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2021; 33(24): 1443–1446. <https://doi.org/10.1109/LPT.2021.3125702>.
23. Yu M., Shi M., Hu W., Yi L. FPGA-Based Dual-Pulse Anti-Interference Lidar System Using Digital Chaotic Pulse Position Modulation. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2021; 33(15): 757–760. <https://doi.org/10.1109/LPT.2021.3093109>.
24. Seo H., Cho G., Kim J., Bae J., Kim S.-J., Chun J.-H., Choi J. A CMOS LiDAR Sensor with Pre-Post Weighted-Histogramming for Sunlight Immunity over 105 klx and SPAD-based Infinite Interference Canceling. *Proceedings of the 2021 Symposium on VLSI Circuits*. 2021; 1–2. <https://doi.org/10.23919/VLSICircuits52068.2021.9492328>.
25. Tsai C.-M., Liu Y.C. Anti-Interference Single-Photon LiDAR Using Stochastic Pulse Position Modulation. *Optics Letters*. 2020; 45(2): 439–442. <https://doi.org/10.1364/OL.384894>.
26. Ishizaki Y., Zhang C., Set S.Y., Yamashita S. A Novel Software-Based Optical Sampling Scheme for High-Precision and Interference-Free Time-of-Flight LiDAR. *Proceedings of the 2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. 2020; 1–2.
27. Fersch T., Weigel R., Koelpin A. A CDMA Modulation Technique for Automotive Time-of-Flight LiDAR Systems. *IEEE Sensors Journal*. 2017; 17(11): 3507–3516. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2688126>.
28. Cheng C.-H., Chen C.-Y., Chen J.-D., Pan D.-K., Ting K.-T., Lin F.-Y. 3D pulsed chaos lidar system. *Optics Express*. 2018; 26(9): 12230–12241. <https://doi.org/10.1364/OE.26.012230>.
29. Matsumura R., Sugawara T., Sakiyama K. A Secure LiDAR with AES-based Side-Channel Fingerprinting. *2018 Sixth International Symposium on Computing and Networking Workshops (CANDARW)*. 2018; 479–482. <https://doi.org/10.1109/CANDARW.2018.00092>.
30. Takefuji Y. Connected Vehicle Security Vulnerabilities [Commentary]. *IEEE Technology and Society Magazine*. 2018; 37(1): 15–18. <https://doi.org/10.1109/MTS.2018.2795093>.
31. Boreysho A.S., Kim A.A., Konyaev M.A., Luginya V.S., Morozov A.V., Orlov A.E. Modern Lidar Systems for Atmosphere Remote Sensing. *PHOTONICS RUSSIA*. 2019; 7(13): 648–657. <https://doi.org/10.22184/1992-7296.FRos.2019.13.7.648.657>
32. Mejeris R. *Lazernoe distantsionnoe zondirovanie* [Remote laser sensing]. Moscow, Mir Publ., 1987.
33. Saleh B., Teih M. *Optika i fotonika. Printsipy i primeneniya* [Optics and photonics. Principles and applications] Dolgoprudny, 2012. Vol. 2.

34. Hwang I.-P., Lee C.-H. Mutual Interferences of a True-Random LiDAR with Other LiDAR Signals. *IEEE Access*. 2020; 8: 124123–124133. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3004891>.

35. Meshcheryakov R., Iskhakov A., Mamchenko M., Romanova M., Uvaysov S., Amirgaliyev Y., Gromaszek K. A Probabilistic Approach to Estimating Allowed SNR Values for Automotive LiDARs in “Smart Cities” under Various External Influences. *Sensors*. 2022; 22(2:609): 1–31. <https://doi.org/10.3390/s22020609>.

Информация об авторе / Information about the Author

Мамченко Марк Владиславович, научный сотрудник лаборатории киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: markmamcha@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6366-9786>

Mark V. Mamchenko, Researcher, Cyberphysical Systems Lab., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: markmamcha@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6366-9786>

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-151-167>

Базовые элементы методологии снижения расхода остаточного ресурса вычислительных устройств систем распределенных вычислений на основе туманных и краевых вычислений

А. Б. Клименко ¹ ✉

¹ Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем им. академика А.В. Каляева Южного федерального университета, ул. Чехова, д. 2, г. Таганрог 347928, Российская Федерация

✉ e-mail: anna_klimenko@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данного исследования является формирование комплекса базовых элементов методологии снижения расхода остаточного ресурса вычислительных устройств, функционирующих в составе систем распределенных вычислений на основе концепций туманных и краевых вычислений. Концепции туманных и краевых вычислений относительно новы и, невзирая на большой объем публикаций по этой теме, вопрос расходования ресурса вычислительных устройств с точки зрения значений ВБР не рассмотрен в литературе. Одновременно с этим, продление срока службы устройств в настоящее время крайне желательно, что делает данное исследование актуальным.

Методы. Основными научными методами, применяемыми в рамках данного исследования, являются анализ (предметных областей), численное моделирование и натурный эксперимент, подтверждающие целесообразность основных аспектов разрабатываемой методологии.

В рамках концепций туманных и краевых вычислений считается целесообразным сдвиг вычислительной нагрузки к источникам данных, которые, как правило, находятся на краю сети. Однако современные исследования не затрагивают оценок влияния такой стратегии в размещении функциональных задач на оценочные значения вероятности безотказной работы устройств, которая характеризует состояние остаточного ресурса устройства. Между тем, возрастание нагрузки на устройства меньшей вычислительной мощности, чем, допустим, устройство в пределах датацентра, приводит к ускорению их изнашивания, что, в свою очередь, выливается в экономические затраты на поддержание функционирующей вычислительной инфраструктуры. Одновременно с этим уменьшается нагрузка на промежуточные устройства сети, поскольку они передают уменьшенные объемы данных, а также увеличивается время, которое может быть использовано на обработку данных, в случае, если последнее производится на краевых устройствах. Разрабатываемая методология предлагает комплексный подход при размещении функциональных задач распределенных информационных систем, учитывающий перечисленные особенности использования концепций туманных и краевых вычислений.

Результаты. Основными результатами данного исследования является описание комплекса базовых методов, составляющих методологию снижения расхода остаточного ресурса вычислительных устройств систем распределенных вычислений на основе туманных и краевых вычислений. Полученный комплекс опирается на разработанные модели и результаты проведенных экспериментальных исследований.

Заключение. В настоящее время, несмотря на массовое использование концепций туманных и краевых вычислений при реализации распределенных информационных систем, не было разработано единой методологии, которая позволила бы уменьшить расход ресурсов вычислительных устройств и тем

самым продлить срок их службы. В рамках данной работы предлагается комплекс методов, дальнейшая проработка которых позволит увеличить срок службы устройств, составляющих вычислительную инфраструктуру систем распределенных вычислений.

Ключевые слова: краевые вычисления; надежность; распределенные системы; управление информационными системами.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Клименко А. Б. Базовые элементы методологии снижения расхода остаточного ресурса вычислительных устройств систем распределенных вычислений на основе туманных и краевых вычислений // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(3): 151-167. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-151-167>.

Поступила в редакцию 08.06.2022

Подписана в печать 03.08.2022

Опубликована 30.09.2022

The Basic Elements of Devices Resource Consumption Decreasing Metodology for Distributed Systems on the Basis of Fog- and Edge-Computing

Anna B. Klimenko ¹ ✉

¹ Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems of Southern Federal University
2 Chekhov str., Taganrog 347928, Russian Federation

✉ e-mail: anna_klimenko@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of this study is to form a set of basic elements of the methodology for reducing the consumption of the residual resource of computing devices operating as part of distributed computing systems based on the concepts of fog and edge computing. The concepts of fog and edge computing are relatively new and, despite the large volume of publications on this topic, the issue of resource consumption of computing devices in terms of FBG values has not been considered in the literature. At the same time, extending the service life of devices is currently highly desirable, which makes this study relevant.

Methods. The main scientific methods used in this study are analysis (of subject areas), numerical simulation and natural experiment, confirming the feasibility of the main aspects of the developed methodology.

Within the framework of the concepts of fog and edge computing, it is considered appropriate to shift the computing load to data sources, which, as a rule, are located at the edge of the network. However, modern studies do not affect the estimates of the impact of such a strategy in the placement of functional tasks on the estimated values of the probability of non-failure operation of devices, which characterizes the state of the residual resource of the device. Meanwhile, an increase in the load on devices with less computing power than, say, a device within a data center leads to an acceleration of their wear, which, in turn, translates into economic costs for maintaining a functioning computing infrastructure. At the same time, the load on the intermediate network devices is reduced, since they transmit reduced amounts of data, and the time that can be used for data processing, if the latter is performed at the edge devices, increases. The developed methodology offers an integrated approach to the placement of functional tasks of distributed information systems, taking into account the listed features of using the concepts of fog and edge computing.

Results. *The main results of this study are the description of a set of basic methods that make up the methodology for reducing the consumption of the residual resource of computing devices of distributed computing systems based on fog and edge computing. The resulting complex is based on the developed models and the results of experimental studies.*

Conclusion. *Currently, despite the massive use of the concepts of fog and edge computing in the implementation of distributed information systems, there has not been developed a unified methodology that would reduce the consumption of resources of computing devices and thereby extend their service life. Within the framework of this work, a set of methods is proposed, the further development of which will increase the service life of devices that make up the computing infrastructure of distributed computing systems.*

Keywords: *edge computing; reliability; distributed systems; information systems management; decentralized control.*

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

For citation: Klimenko A. B The Basic Elements of Devices Resource Consumption Decreasing Metodology for Distributed Systems on the Basis of Fog- and Edge-Computing. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2022; 26(3): 151-167 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-151-167>.

Received 08.06.2022

Accepted 03.08.2022

Published 03.09.2022

Введение

В настоящее время концепции туманных и краевых вычислений все шире применяются на практике. Основной тому причиной является валлообразное увеличение циркулирующих в сети данных, в частности, данных, подлежащих обработке в информационных системах и автоматических и автоматизированных информационно-управляющих системах. Данные должны передаваться от источников (различных сенсоров, видео-камер, КВЧ/СВЧ радаров и т.д.) к локациям программ обработки [1-5]. Однако в условиях географической разнесенности вычислительных компонентов системы становится чрезвычайно сложно обеспечивать должный уровень Quality of service по причине плохой предсказуемости времени доставки данных к месту обработки [6]. Концепция туманных вычислений (fog-com-

puting) и краевых вычислений (edge-computing) предполагает сдвиг обработки информации к ее источникам, как правило, к краю сети. При этом туманные вычисления используют промежуточные устройства, где принимается решение о том, отправлять данные в облачный сервис или обработать их на «туманном» узле, а краевые вычисления предполагают обработку данных непосредственно сообществами краевых устройств, например, состоящими в ЛВС организации [7-10]. Очевидно, что устройства, состоящие в датацентрах, на которых, собственно, происходит предоставление облачных сервисов, значительно превосходят вычислительными мощностями устройства туманного и краевого слоя сети. Кроме того, край сети динамичен – и тем самым осложняется решение функциональных задач (пользовательское устройство может оказаться вне зоны действия сети, может быть

выключено, может исчерпать запас батареи и т.д.). Проблема изменения инфраструктуры может быть решена путем перераспределения решаемых задач среди функционирующих устройств, однако любое решение такой задачи добавляет нагрузку на устройства. Таким образом, смещение вычислительной нагрузки к краю сети в угоду соответствия QoS приводит к тому, что устройства с относительно невысокой вычислительной мощностью работают в условиях повышенной нагрузки, что приводит к более быстрой выработке их ресурса.

Остаточный ресурс устройства оценивается значением вероятности безотказной работы (ВБР) на выбранный момент времени. В свою очередь, расчет ВБР для вычислительных устройств может быть произведен на основании оценки их загруженности.

Данный вопрос остался неосвещенным в публикациях, представленных в открытой печати.

В литературе [11-15] представлена подробная классификация направлений исследований в области туманных вычислений, а именно:

1. Управление вычислительными ресурсами.
2. Управление коммуникацией.
3. Организация взаимодействие облачного и туманного слоя.
4. Прикладные исследования для реализации систем здравоохранения.
5. Прикладные системы для сетей подвижных устройств.
6. «Умный» дом и «умный» город.

7. Алгоритмы по разделению вычислительных ресурсов.

8. Алгоритмы по организации хранения данных.

9. Алгоритмы, оптимизирующие энергопотребление.

Кроме того, «надежность» в рамках проводимых исследований туманных и краевых вычислений трактуется как «доступность» сервиса [16], в то время как вопросы сбережения остаточных ресурсов устройств не затронуты, несмотря на актуальность.

Поэтому, представляется целесообразной разработка эффективной методологии, ориентированной на бережное расходование остаточного ресурса устройств, принимающих участие в туманных либо краевых вычислениях и выраженного в ВБР устройства на заданный момент времени.

Материалы и методы

Модель оценки зависимости ВБР устройства от нагрузки

ВБР отдельного устройства описывается экспоненциальным законом. Более того, в соответствии с [17,18], ВБР и интенсивность отказов находится в зависимости от рабочей нагрузки на устройство, как показано в выражениях (1,2). Интенсивность отказов устройства описывается следующим выражением:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot 2^{\Delta T/10}, \quad (1)$$

где λ – интенсивность отказов устройства;

λ_0 – интенсивность отказов ненагруженного устройства;

ΔT – температура устройства.

Так как температура устройства зависит от рабочей нагрузки, то, в соответствии с [9]:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot 2^{kD/10}, \quad (2)$$

где D – процент загруженности устройства;

k – коэффициент пропорциональности между загруженностью и температурой устройства.

Модель оценки влияния применения концепций туманных/краевых вычислений на ВБР устройства с точки зрения устройства, производящего вычисления

Исходя из того, что ВБР устройства рассчитывается в соответствии с экспоненциальным законом, будем полагать, что

$$P(t) = e^{-\lambda_0 \cdot 2^{kW/10T} t}, \quad (3)$$

где W – суммарная трудоемкость операций, совершаемых устройством,

k – коэффициент, связывающий загруженность устройства и температуру,

T – время, отводимое на выполнение решения функциональных задач, включая задачи передачи и приема данных,

P – производительность вычислительного устройства,

t – время, для которого производится расчет ВБР.

Суммарная трудоемкость операций для устройства, которое работает как транзитное, т.е., передает данные на другие устройства, вычисляется как

$$W = W_r + W_s + \sum W_{tr}, \quad (4)$$

где W_s – трудоемкость операций отправки данных в сеть,

W_r – трудоемкость операций получения данных из сети.

В случае, если на узел переносится функциональная задача, получаем следующее:

$$W' = W_r + W_s' + \sum W_{tr} + W_f, \quad (5)$$

где W_s является трудоемкостью передачи данных без обработки в облако.

W_s' является трудоемкостью при передаче данных в облако после предварительной обработки.

Таким образом, для отдельного устройства перенос на него вычислительной нагрузки в целом имеет негативное влияние, как показано на рис.1 (график Pt2 расположен ниже и иллюстрирует результат повышения вычислительной нагрузки на устройство). Однако оно может быть частично нивелировано за счет сокращения передаваемых данных, что отражается на трудоемкости W_s' .

Также на рис.1 видно, что, несмотря на некоторое сокращение объема передаваемых после предварительной обработки данных и, следовательно, генерируемой при этом загруженности устройства, значения ВБР хуже, чем в ситуации, когда устройство передает данные без обработки.

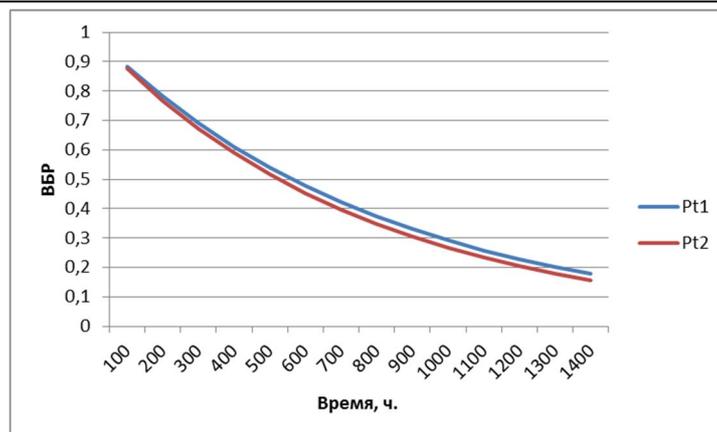


Рис. 1. Пример снижения значения ВБР краевого устройства при переносе на него дополнительной вычислительной нагрузки

Fig.1. The example of reliability value decrease due to the computational workload increase

Модель оценки влияния размещения функциональных задач ИС на ВБР устройства с точки зрения транзитных устройств

Для устройства, которое осуществляет транзит данных, перенос их обработки на предыдущие узлы приводит к уменьшению нагрузки на передачу данных, а именно:

$$W = \sum W_{tr} - \sum W_{пер} , \quad (6)$$

где $W_{пер}$ – трудоемкость передачи данных, которые прошли предварительную обработку на устройстве туманно-го/краевого слоя сети.

Модель оценки влияния размещения функциональных задач ИС на ВБР группы устройств

ВБР для группы устройств оценивается как произведение их ВБР, а именно [19]:

$$P(t) = \prod P_i(t). \quad (7)$$

Таким образом, для сравнения влияния переноса вычислительной нагрузки, следует сравнивать значения ВБР

устройств с учетом того, что на крайнем устройстве объем вычислений увеличивается, а на устройствах, которые ранее были транзитными и участвовали исключительно в передаче данных, объем вычислений уменьшается.

На примере цепочки из четырех устройств рассмотрим влияние переноса нагрузки.

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) \cdot P_4(t). \quad (8)$$

Учитывая выражения (3, 6, 7) для оценки влияния загруженности устройств, получим следующие графики, демонстрирующие влияние переноса нагрузки на ВБР группы устройств.

На графике рис. 2 видно, что значения ВБР группы устройств, реализующих вычисления на краю, выше – это происходит по крайней мере за счет сокращения нагрузки, генерируемой необходимостью передачи больших объемов данных. При этом необходимо учитывать, что значения ВБР устройства, осуществляющего обработку, ухудшаются за счет повышения нагрузки.

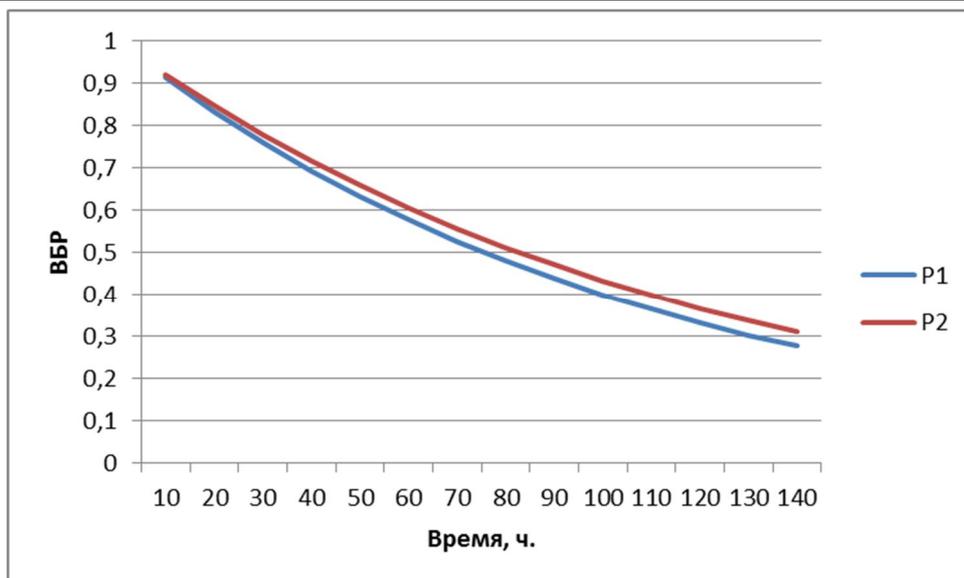


Рис. 2. Иллюстрация ситуации увеличения значений ВБР группы устройств в случае переноса функциональной задачи обработки на устройство туманного/краевого слоя сети

Fig. 2. The illustration of device group reliability increase in case of shift of the functional task to the fog- edge- device

Модель оценки увеличения времени на обработку данных

Опираясь на представленные модели оценки влияния переноса нагрузки на ВБР отдельного устройства и на ВБР группы устройств, можно сделать предварительные выводы, а именно:

- перенос нагрузки на краевое устройство меньшей производительности негативно влияет на значения его ВБР;

- за счет существенного уменьшения объема транзитных данных, значения ВБР группы устройств повышается.

Рассмотрим описанную ситуацию переноса вычислительной нагрузки с точки зрения временных затрат.

Время передачи данных складывается из следующих компонентов:

- время приема данных из сети;
- время отправки данных в сеть.

Временем передачи по каналу связи можно пренебречь.

Таким образом, время передачи от узла А в узел В можно оценить как сумму времен приема и передачи данных по всем промежуточным узлам от источника данных до приемника. То есть, для цепочки из N узлов, время передачи данных будет оцениваться как:

$$T_0 = \sum_{i=1}^N (t_{\text{receive}}^i(V_{\text{receive}}) + t_{\text{send}}^i(V_{\text{send}})). \quad (9)$$

При этом время приема-передачи в сеть зависит от объема принимаемых и передаваемых данных.

Пусть зависимость между временем приема-отправки данных и их объемами имеет следующий вид:

$$t_{\text{receive}} = \zeta V_{\text{receive}}; \quad t_{\text{send}} = \zeta V_{\text{send}}.$$

Таким образом, сравнивая ситуации передачи данных в облако и обработки

данных на краевом устройстве, могут быть получены следующие оценки (при допущении, что после обработки объем данных уменьшается, например, в 4 раза).

Для варианта обработки данных в облаке:

$$T_1 = 4\zeta(V_{\text{receive}} + V_{\text{send}}). \quad (10)$$

Для варианта обработки на краевом устройстве:

$$T_2 = \zeta(V_{\text{receive}} + 0,25V_{\text{send}}) + 1,5\zeta V_{\text{send}} = \zeta(V_{\text{receive}} + 1,75V_{\text{send}}). \quad (11)$$

Таким образом, время сокращается до 2,9 раз относительно передачи пол-

ного объема данных без предварительной разработки.

При этом, если данные не передаются дальше краевого или туманного устройства-обработчика, тенденции сокращения времени усиливаются.

Проведенный эксперимент по передаче данных из Ростова-на-Дону на узел, расположенный в датацентре в Калифорнии (сервис Amazon), продемонстрировал следующее (рис.3).

На основании результатов натурального эксперимента сделаем допущение о том, что при удвоении объема передачи данных происходит увеличение времени передачи в 2,5-4 раза.

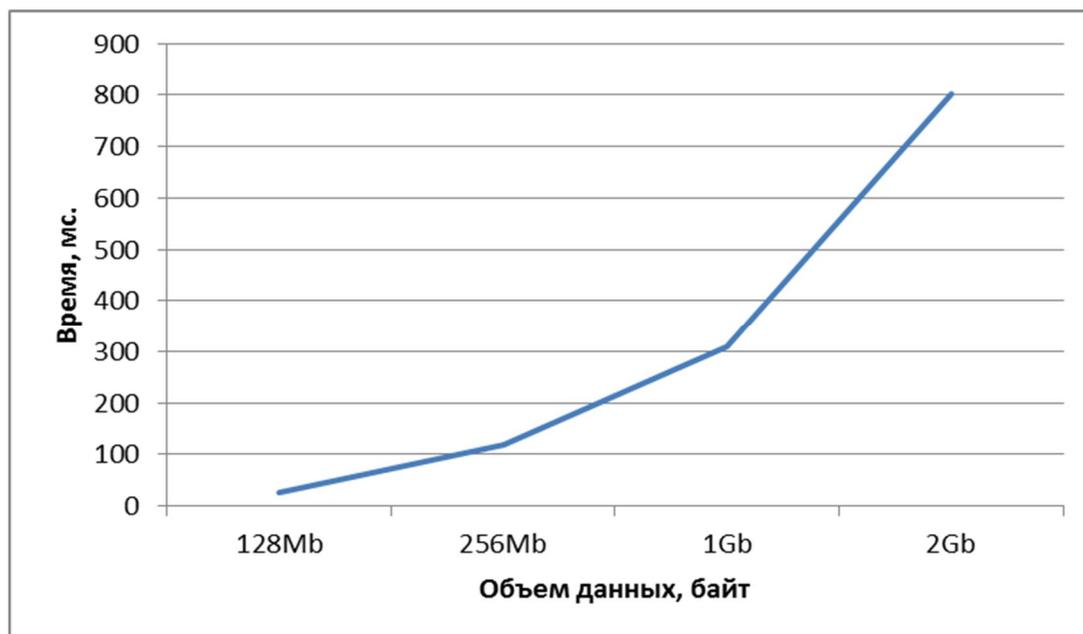


Рис. 3. Зависимость времени передачи данных от их объема

Fig. 3. The dependence between the data transfer time and the data volume

Оценка влияния функциональных задач на ВБР группы устройств с учетом увеличения времени на обработку данных

Ранее было показано, что при уменьшении объемов передаваемых данных по

сети уменьшается и время, необходимое на их передачу. Проведенный натуральный эксперимент подтвердил тенденцию, полученную аналитически.

Таким образом, при приближении обработки данных к их источнику, по-

является дополнительное время, которое может быть использовано для расширения временного интервала, отводимого краевому устройству для обработки данных. Также это время может быть использовано для расширения временного интервала, необходимого для отправки и получения данных промежуточными узлами. Опираясь на выражения (3, 6, 7) оценим эффект добавления времени на ВБР группы устройств (рис.4, 5).

Проиллюстрируем результат оценки значений ВБР для краевого устройства, после перенесения на него вычислительной нагрузки и добавления времени на ее выполнение (рис. 6).

На рис. 6 показано, что значения ВБР краевого устройства в условиях повышения вычислительной нагрузки и увеличения времени на ее выполнение, увеличиваются. Следовательно, этот подход мо-

жет быть использован для нейтрализации влияния дополнительной нагрузки на использование ресурса устройства.

Базовые положения методологии снижения расхода остаточного ресурса вычислительных устройств систем распределенных вычислений на основе туманных и краевых вычислений

Таким образом, опираясь на разработанные модели, результаты натурного эксперимента и компьютерного моделирования, были получены оценки, которые позволяют сделать следующие важные выводы:

– для распределенной географически информационной системы, при переносе вычислительной нагрузки на краевые устройства или устройства туманного слоя меньшей производительности, значения ВБР этих устройств снижаются по сравнению со значениями в условиях передачи данных в облако;

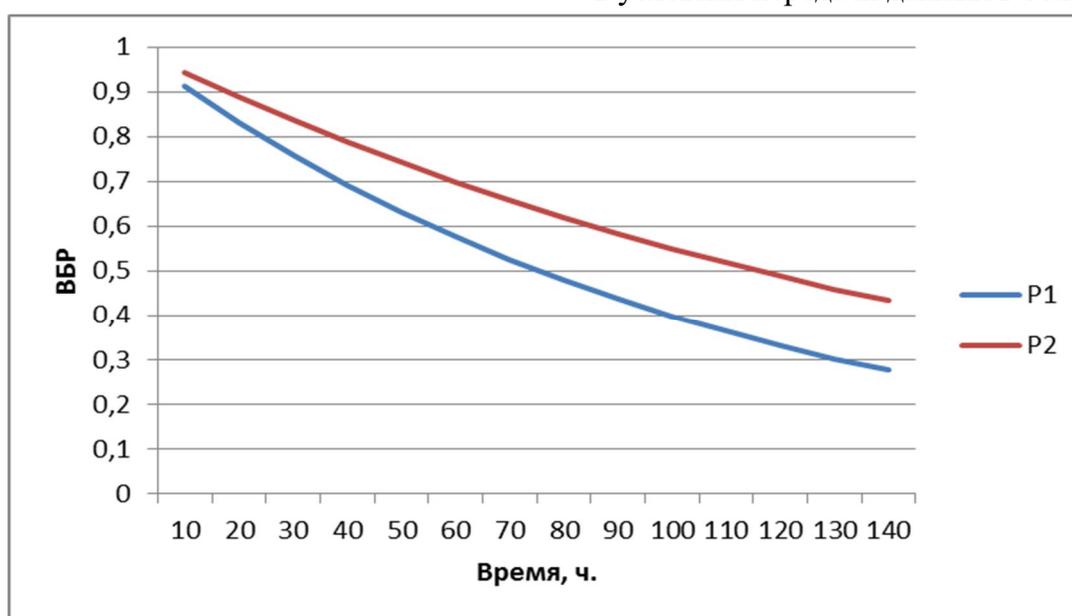


Рис. 4. Дополнительное время выделено на задачи передачи и получения данных в цепочке устройств

Fig. 4. The additional time is given for the data transfer tasks

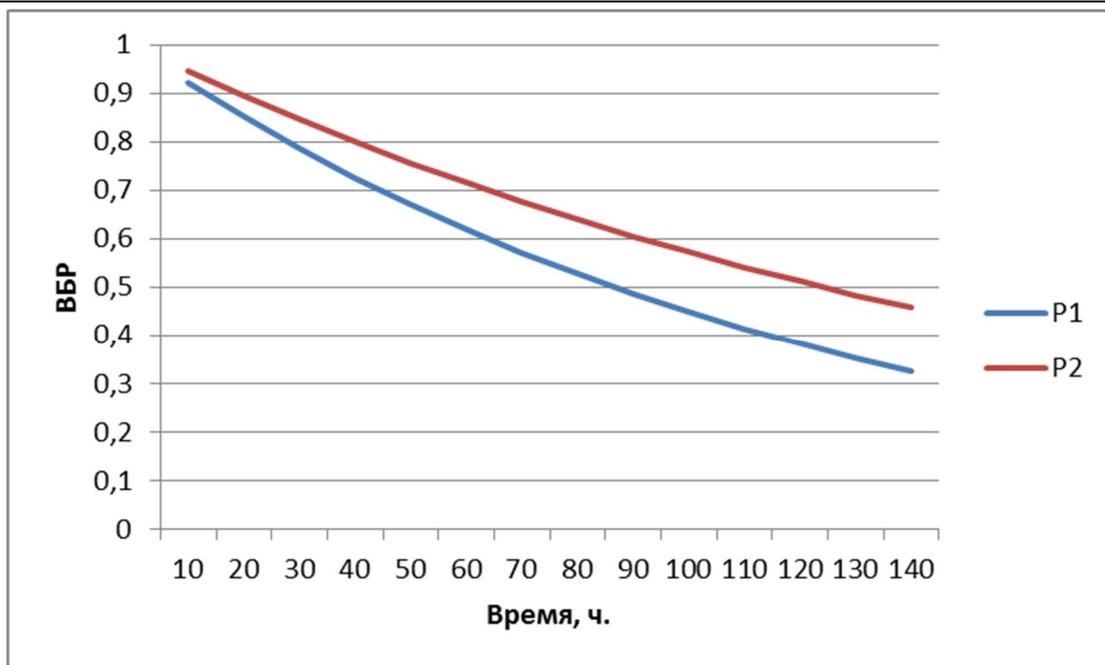


Рис. 5. Иллюстрация результата добавления 70% дополнительного времени на выполнение функциональной задачи для краевого устройства и 30% на прием-передачу данных

Fig. 5. The illustration of 70% extra-time addition to the edge-device task performing and of 30% extra-time addition to the data transfer tasks implementation

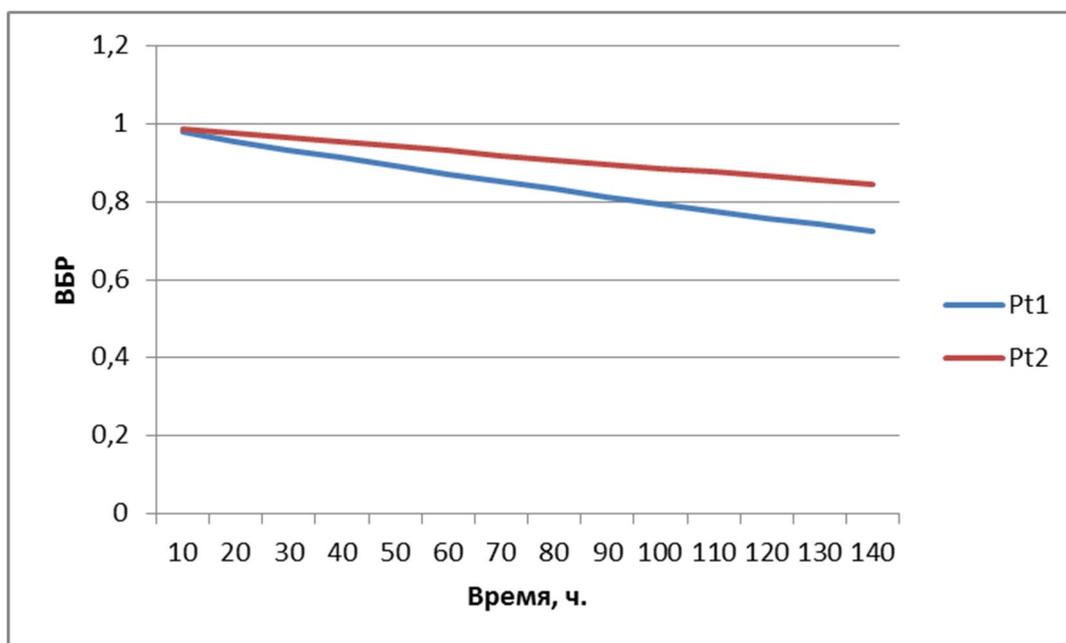


Рис. 6. Сравнение ВБР краевого устройства для ситуации с выполнением функциональной задачи и для ситуации выполнения этой же задачи в условиях выделения дополнительного времени

Fig. 6. A comparison of the edge device reliability functions for the cases of functional task performing and functional task performing under extra-time conditions

– однако в случае переноса вычислительной нагрузки на край сети, существенно уменьшается загруженность промежуточных устройств, за счет чего увеличивается значение ВБР этих устройств, и для группы устройств оценка ВБР улучшается;

– также в случае переноса обработки данных на край сети последующие промежуточные устройства передают в облако значительно меньшие объемы данных, что также уменьшает необходимое для этого время. Полученное таким образом дополнительное время может быть добавлено ко времени выполнения функциональной задачи на краевом устройстве, за счет чего может быть снижена его загруженность и, следовательно, повышена ВБР.

Основные компоненты разрабатываемой методологии опираются на перечисленные выше утверждения. Таким образом, основные компоненты методологии будут следующими:

– метод снижения расхода ресурсов устройств краевого и туманного слоя сети (за счет использования дополнительного времени для снижения загруженности),

– метод выбора устройств для размещения функциональных задач,

– метод снижения расхода ресурсов устройств краевого и туманного слоя сети в условиях высокой динамики инфраструктуры.

Следует отметить, что выбор устройств для размещения функциональных задач является отдельной ком-

плексной задачей, решаемой в рамках описанной проблемы и непосредственно связан с процедурой реконфигурации, которая неизбежна в системах с высокой динамикой устройств. В связи с этим возникают следующие вопросы:

– сбор данных об устройствах, функционирующих в рамках системы. Обоснование выбора способа сбора и поддержания актуальности данных: разовые опросы устройств либо поддержание функционирования распределенного реестра данных с точки зрения загруженности устройств;

– формирование групп устройств в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры.

Формирование групп устройств также является комплексной задачей, учитывая ограничения на время ее выполнения и ограничения на используемые ресурсы. В связи с этим одной из подзадач формирования групп устройств будет сокращение времени решения распределительной задачи, в том числе, за счет рационального формирования поискового пространства [20].

Результаты и их обсуждение

В данной работе поставлена актуальная задача разработки методологии снижения расхода остаточного ресурса вычислительных устройств систем распределенных вычислений на основе туманных и краевых вычислений. Внимание акцентируется на устройствах туманного и краевого слоев с целью увеличения срока их службы и, соответ-

ственно, стоимости эксплуатации системы. Остаточный ресурс оценивается значением ВБР устройства. Следует отметить, что в рамках данной работы использовано допущение о том, что для каждого устройства неизвестно время его функционирования и, соответственно, степень изношенности. Поэтому предполагается применение единой стратегии по увеличению значений ВБР для всех устройств-участников.

Разработанные аналитические модели позволили сделать вывод о том, что, во-первых, перемещение вычислительной нагрузки на устройства меньшей вычислительной мощности снижают их значения ВБР на выбранном временном интервале. Однако для группы устройств, включая промежуточные устройства, служащие для транзита данных в облако, в целом оценочное значение ВБР повышается, за счет снижения той нагрузки, которая генерируется при передаче данных промежуточными устройствами.

При этом, перемещая вычислительную нагрузку к краю сети, и оставляя необходимость передачи частично обработанных данных в облако, мы получаем выигрыш в виде дополнительного времени за счет общего уменьшения времени передачи данных меньшего объема. Предложенные значения изменения потребления времени приведены без учета возможного уменьшения пути данных в случае, если финальная обработка также производится на устройстве краевого или туманного слоя и поэтому являются нижней оценкой возможного выигрыша во времени. Однако, как показано на графиках рис. 4 и 5, в случае распределения экстра-времени для передачи данных, значения ВБР группы устройств повышается до 10%, а в случае распределения 70% полученного дополнительного времени на решение функциональной задачи, значения ВБР группы устройств повышается до 15%, при этом для краевого устройства происходит повышение значений ВБР до 7% по результатам эксперимента.

Таблица 1. Результаты моделирования влияния переноса вычислительной нагрузки на ВБР устройств и групп устройств

Table 1. Results of modeling the impact of the transfer of computational load on the VBR of devices and groups of devices

	Применение концепции туманных вычислений / Application of the concept of foggy computing	Применение концепции туманных вычислений и распределение нагрузки во времени / Application of the concept of foggy computing and load distribution over time
ВБР краевого устройства	Ухудшение до 5%	Улучшение до 15%
ВБР группы устройств, включая краевое	Улучшение до 3%	Улучшение до 7%

Поэтому методология, основанная на распределении вычислительной нагрузки по дополнительному времени, появление которого является результатом использования концепции туманных и краевых вычислений, представляется перспективной с точки зрения ресурсосбережения устройств, принимающих участие в вычислительном процессе.

Выводы

В настоящее время туманные и краевые вычисления обретают популярность в силу необходимости повышения качества сервисов, а также загрузки сетевой инфраструктуры. Однако практически не уделено внимания такому аспекту эксплуатации распределенных информационных систем на основе краевых и туманных вычислений, как срок службы устройств туманного и краевого слоев сети. Возможность продления срока службы таких устройств оказывает позитивный эффект на стоимость эксплуатации распределенных информационных систем, поэтому снижение расхода ресурсов устройств является актуальной современной проблемой, охватывающей многие классы технических систем.

В рамках исследований туманных и краевых вычислений не уделено внима-

ние такому подходу к ресурсосбережению, поэтому вполне очевидна необходимость разработки методологии, ориентированной на сохранение остаточного ресурса вычислительных устройств.

Данная работа посвящена формированию теоретических основ методологии снижения расхода остаточного ресурса вычислительных устройств систем распределенных вычислений на основе туманных и краевых вычислений. На основе аналитических моделей, сделаны выводы о том, что перенос дополнительной нагрузки на устройство снижает его значения ВБР, при этом, однако, повышаются значения ВБР устройств, ранее передающих большие объемы данных в облако. Тем не менее, концепции туманных и краевых вычислений предполагают обработку данных на краю сети (в туманном слое), в результате чего существенно снижается объем данных, передаваемых в облако, и, следовательно, снижается время, для этого необходимое. Использование дополнительного времени с целью распределения вычислительной нагрузки на устройство и снижение таким образом загруженности вычислителя приводят к повышению значений ВБР как самого устройства, так и группы устройств, участвующих в вычислениях.

Список литературы

1. Moysiadis V., Sarigiannidis P., Moscholios I. (2018). Towards Distributed Data Management in Fog Computing // *Wireless Communications and Mobile Computing*. <https://doi.org/10.1155/2018/7597686>

2. Aazam M., Zeadally S., Harras K. A. Offloading in fog computing for IoT: Review, enabling technologies, and research opportunities. *Future Generation Computer Systems*. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.04.057>

3. Fog computing in healthcare Internet of Things: A case study on ECG feature extraction / T. N. Gia, M. Jiang, A. M. Rahmani, T. Westerlund, P. Liljeberg, H. Tenhunen // *Proceedings - 15th IEEE International Conference on Computer and Information Technology, CIT 2015, 14th IEEE International Conference on Ubiquitous Computing and Communications, IUCC 2015, 13th IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Self-Adaptive Systems, DAS 2015*, 2015. 356–363. <https://doi.org/10.1109/CIT/IUCC/DASC/PICOM.2015.51>

4. Chueshev A., Melekhova O., Meshcheryakov R. CLOUD ROBOTIC PLATFORM ON BASIS OF FOG COMPUTING APPROACH // *Lecture Notes in Computer Science*. 2018. Vol. 11097 LNAI. P. 34-43.

5. Ануфриева Н.Ю., Мещеряков Р.В., Шевцова Г.А. Оценивание результативности работы центра информационного обслуживания // *Труды СПИИРАН*. 2010. № 3 (14). С. 76-90. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2012. Т. 55. № 11. С. 63-66.

6. Liu, Kangkai & Guo, Linhan & Wang, Yu & Chen, Xianyu. (2020). Timely Reliability Analysis of Virtual Machines Considering Migration and Recovery in an Edge Server. *Sensors*. 10.3390/s21010093.

7. Stojmenovic I., Wen S. The Fog Computing Paradigm: Scenarios and Security Issues. *Proceedings of the 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, 2014, 2, 1–8. <https://doi.org/10.15439/2014F503>

8. Big data processing in cloud computing environments / A. Noraziah, M. A. I. Fakherldin, K. Adam, M. A. Majid // *Advanced Science Letters*. 2017/ <https://doi.org/10.1166/asl.2017.10227>

9. Aazam M., Huh E. N. E-HAMC: Leveraging Fog computing for emergency alert service // *2015 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops, PerCom Workshops 2015*, 518–523. <https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2015.7134091>

10. al Faruque M. A., Vatanparvar K. Energy Management-as-a-Service over Fog Computing Platform // *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(2), 161–169. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2015.2471260>

11. A Comprehensive Survey on Fog Computing: State-of-the-Art and Research Challenges / C. Mouradian, D. Naboulsi, S. Yangui, R.H. Glitho, M.J. Morrow, P.A. Polakos // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20, 416-464.

12. Vehicular Fog Computing: A Viewpoint of Vehicles as the Infrastructures” / X. Hou, Y. Li, M. Chen, D. Wu, D. Jin, S. Chen // “*IEEE Trans. Veh. Technol.*, Jun. 2016, vol. 65, no. 6, pp. 3860 – 3873.

13. R. Brzoza - Woch, M. Konieczny, P. Nawrocki, T. Szydło, and K. Zielinski “Embedded systems in the application of fog computing - Levee monitoring use case” // *11th IEEE Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES)*, 2016, pp. 1 – 6.

14. Xu Y., Mahendran V., Radhakrishnan S. “Towards SDN - based fog computing: MQTT broker virtualization for effective and reliable delivery” // 8th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS), 2016, pp. 1 – 6.
15. M. Aazam and E. - N. Huh, “E - HAMC: Leveraging Fog computing for emergency alert service” // IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops), 2015, pp. 518 – 523.
16. Inaltekin H., Gorlatova M., Mung C. (2017). Virtualized Control over Fog: Interplay Between Reliability and Latency. *CoRR, abs/1712.0*. <https://arxiv.org/pdf/1712.00100.pdf>
17. А., S. Dolgovechnost Integralnih schem I proizvodstvenniye metody ee prognozirovaniya. *ChipNews*, 2002, 6, 44–49.
18. Melnik E., Korovin I., Klimenko A. Improving dependability of reconfigurable robotic control system // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): 2017. Vol. 10459 LNAI*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66471-2_16
19. Тимошенко С. П., Симонов Б. М., Горошко В. Н. Основы теории надежности. М.: Изд-во «Юрайт», 2019. 445 с. URL: <https://urait.ru/bcode/433079> (дата обращения: 12.04.2022).
20. Klimenko A., Safronenkova I. A Technique of Workload Distribution Based on Parallel Algorithm Structure Ontology. 2019. 10.1007/978-3-030-30329-7_4.

References

1. Moysiadis V., Sarigiannidis P., Moscholios I. (2018). Towards Distributed Data Management in Fog Computing. *Wireless Communications and Mobile Computing*. <https://doi.org/10.1155/2018/7597686>
2. Aazam M., Zeadally S., Harras K. A. Offloading in fog computing for IoT: Review, enabling technologies, and research opportunities. *Future Generation Computer Systems*, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.04.057>
3. Gia T. N., Jiang M., Rahmani A. M., Westerlund T., Liljeberg P., Tenhunen H. Fog computing in healthcare Internet of Things: A case study on ECG feature extraction. *Proceedings - 15th IEEE International Conference on Computer and Information Technology, CIT 2015, 14th IEEE International Conference on Ubiquitous Computing and Communications, IUCC 2015, 13th IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Se*, 2015, 356–363. <https://doi.org/10.1109/CIT/IUCC/DASC/PICOM.2015.51>
4. Chueshev A., Melekhova O., Meshcheryakov R. Cloud robotic platform on basis of fog computing approach. *Lecture Notes in Computer Science*. 2018. Vol. 11097 LNAI, pp. 34-43.
5. Anufrieva N.Yu., Meshcheryakov R.V., Shevtsova G.A. Otsenivanie rezul'tativnosti raboty tsentra informatsionnogo obsluzhivaniya [Evaluation of the effectiveness of the in-

formation service center]. *Trudy SPIIRAN = Proceedings of SPIIRAN*, 2010, no 3 (14), pp. 76-90. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = News of higher educational institutions. Instrumentation*.

6. Liu Kangkai, Guo, Linhan, Wang Yu, Chen Xianyu. (2020). Timely Reliability Analysis of Virtual Machines Considering Migration and Recovery in an Edge Server. *Sensors*. 10.3390/s21010093.

7. Stojmenovic I., Wen S. The Fog Computing Paradigm: Scenarios and Security Issues. *Proceedings of the 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, 2014, 2*, 1–8. <https://doi.org/10.15439/2014F503>

8. Noraziah A., Fakherldin M. A. I., Adam K., Majid M. A. Big data processing in cloud computing environments. *Advanced Science Letters*. 2017. <https://doi.org/10.1166/asl.2017.10227>

9. Aazam M., Huh E. N. E-HAMC: Leveraging Fog computing for emergency alert service. *2015 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops, PerCom Workshops 2015*, 518–523. <https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2015.7134091>

10. al Faruque M. A., Vatanparvar K. Energy Management-as-a-Service over Fog Computing Platform. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(2), 161–169. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2015.2471260>

11. Mouradian C., Naboulsi D., Yangui S., Glitho R.H., Morrow M.J., Polakos P.A. A Comprehensive Survey on Fog Computing: State-of-the-Art and Research Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20, 416-464.

12. Hou X., Li Y., Chen M., Wu D., Jin D., Chen S., “Vehicular Fog Computing: A Viewpoint of Vehicles as the Infrastructures,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Jun. 2016, vol. 65, no. 6, pp. 3860 – 3873.

13. Brzoza - Woch R., Konieczny M., Nawrocki P., Szydło T., Zielinski K. “Embedded systems in the application of fog computing - Levee monitoring use case”. *11th IEEE Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES)*, 2016, pp. 1 – 6

14. Xu Y., Mahendran V., Radhakrishnan S. “Towards SDN - based fog computing: MQTT broker virtualization for effective and reliable delivery” *8th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, 2016, pp. 1 – 6.

15. Aazam M., E. - N. Huh, “E - HAMC: Leveraging Fog computing for emergency alert service”. *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops)*, 2015, pp. 518 – 523.

16. Inaltekin H., Gorlatova M., Mung C. (2017). Virtualized Control over Fog: Interplay Between Reliability and Latency. *CoRR, abs/1712.0*. <https://arxiv.org/pdf/1712.00100.pdf>

17. A., S. Dolgovechnost Integralnih schem I proizvodstvenniye metody ee prognozirovaniya. *ChipNews*, 2002, 6, 44–49.

18. Melnik E., Korovin I., Klimenko A. Improving dependability of reconfigurable robotic control system. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes*

in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2017, vol. 10459 LNAI. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66471-2_16

19. Timoshenkov S. P., Simonov B. M. , Goroshko V. N. *Osnovy teorii nadezhnosti*. [Fundamentals of reliability theory]. Moscow, Yurait Publ., 2019. 445 p. Available at: <https://urait.ru/bcode/433079> (accessed: 12.04.2022).

20. Klimenko A., Safronenkova I. A Technique of Workload Distribution Based on Parallel Algorithm Structure Ontology, 2019. 10.1007/978-3-030-30329-7_4.

Информация об авторе / Information about the Author

Клименко Анна Борисовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем имени академика А.В. Каляева Южного федерального университета, г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: anna_klimenko@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6527-8108>

Anna B. Klimenko, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Research Fellow, Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems of Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation, e-mail: anna_klimenko@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6527-8108>

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 , \tg 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 20). Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 22-25-26, тел/факс (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Изменения и дополнения к правилам оформления статей и информацию об опубликованных номерах можно посмотреть на официальном сайте журнала: <https://science.swsu.ru>.