


МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

**Юго-Западного
государственного
университета**

Научный журнал

Том 25 № 4 / 2021



Proceedings

**of the Southwest
State University**

Scientific Journal

Vol. 25 № 4 / 2021



**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: 05.02.05; 05.02.07; 05.02.10.

Строительство: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

Информатика, вычислительная техника и управление: 05.13.01; 05.13.05; 05.13.06; 05.13.10; 05.13.18; 05.13.19.

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);

Алексеев Юрий Владимирович, д-р архитектуры, профессор; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (г. Москва, Россия);

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

Бок Томас, д-р техн. наук, профессор, Мюнхенский технический университет (г.Мюнхен, Германия);

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

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

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);

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

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

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

Зотов Игорь Валерьевич, д-р техн. наук, профессор,
Юго-Западный государственный университет
(г.Курск, Россия);

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

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

Колчунов Владимир Иванович, д-р техн.наук,
профессор, член Российской академии архитектуры
и строительных наук, Юго-Западный государственный
университет (г.Курск, Россия);

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

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

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

Шах Райнер, д-р техн. наук, профессор, Дрезденский
технический университет (г.Дрезден, Германия).

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, 2021



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 20.12.2021.

Дата выхода в свет 30.12.2021. Формат 60x84/8.

Бумага офсетная. Усл.печ.л. 25,6.

Тираж 1000 экз. Заказ 87.

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: 05.02.05; 05.02.07; 05.02.10.

Construction: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

Computer science, computer engineering and control: 05.13.01; 05.13.05; 05.13.06; 05.13.10; 05.13.18; 05.13.19.

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);

Yurii V. Alekseev, Dr. of Sci. (Architecture), Professor, Moscow State National Research University of Civil Engineering (Moscow, Russia);

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

Thomas Bock, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Technical University of Munich (Munich, Germany);

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);

Sergey V. Degtyarev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, 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);

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

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);

Igor V. Zotov, 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);

Shah R., Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Technical University of Dresden (Dresden, Germany)

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 №ФС77-42691 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, 2021



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

Singed to print 20.12.2021.

Release date 30.12.2021. Format 60x84/8.

Offset paper. Printer's sheets 25,6.

Circulation 1000 copies. Order 87.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

Конструкторско-технологическое обеспечение процесса глубокого сверления жаропрочной стали	8
<i>Яцун Е. И., Могилев С. Н.</i>	
Исследование процесса глубокого сверления нержавеющей стали	19
<i>Яцун Е.И., Зубкова О.С., Могилев С.Н.</i>	

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

Информационно-измерительная система мониторинга балок в строительных конструкциях	29
<i>Локтионов А. П.</i>	

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

Разработка генератора псевдослучайных чисел на основе кубических радикалов.....	52
<i>Таныгин М.О., Крыжевич Л.С., Зыков П.С.</i>	
Синтез алгоритма диагностики работы электроприводов камеры сушки по датчикам температуры	70
<i>Прохоров С. В., Шилин А. А., Примочкин И. А.</i>	
Структура и схемотехническое решение двунаправленной беспроводной системы передачи энергии для роевых роботов	84
<i>Крестовников К. Д., Семенов А. В., Ерашов А. А.</i>	
Когнитивное моделирование развития социальной напряженности в сети Интернет.....	104
<i>Клименко А. Б., Коровин Я. С., Сафроненкова И. Б.</i>	
Разработка структуры информационной системы мониторинга данных о физической активности человека	122
<i>Абрамова Е. С., Орлов А. А., Макаров К. В.</i>	
Управление поворотами мобильного робота, подобного автомобилю	134
<i>Кабалан А.Э.А., Гайдук А.Р., Абу Хамдан Н.</i>	
Модель параметров отклонений маршрута полёта беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории	145
<i>Андронов В. Г., Чуев А. А., Князев А. А.</i>	
Система управления интеллектуальным светофором на основе нечеткой логики	162
<i>Бобырь М. В., Храпова Н. И., Ламонов М. А.</i>	
Метод отслеживания процессов взаимодействия пользователей с объектами на видеопоследовательностях	177
<i>Яковлев Р. Н.</i>	
Методика формирования оптимальной совокупности запасного оборудования в организационно-технологической системе обеспечения механической сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера	201
<i>Аверченкова Е.Э., Шабанов А.А.</i>	
К сведению авторов	220

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

Design and Engineering Support of the Process of Deep Drilling of Heat-resistant Steel	8
---	----------

Yatsun E. I., Mogilev S.N.

Investigation of the Process of Deep Drilling of Stainless Steel	19
---	-----------

Yatsun E. I., Zubkova O. S., Mogilev S.N.

CONSTRUCTION

Original articles

Information and Measurement System for Monitoring Beams in Building Structures.....	29
--	-----------

Loktionov A. P.

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

Development of a Pseudorandom Number Generator Based on Cubic Radicals	52
---	-----------

Tanygin M. O., Kryzhevich L. S., Zykov P. S.

Synthesis of an Algorithm for Diagnosing the Operation of Drying Chamber Electric Drives According to Temperature Sensors	70
--	-----------

Prohorov S. V., Shilin A. A., Primochkin I. A.

Structure and Circuit Design of a Bidirectional Wireless Power Transmission System for Swarm Robots	84
--	-----------

Krestovnikov K. D., Semenov A. V., Erashov A. A.

Cognitive Modeling of the Development of Social Tension on the Internet.....	104
---	------------

Borisovna K. A., Korovin I. S., Safronenkova I. B.

Development of the Structure of an Information System for Monitoring Human Physical Activity Data.....	122
---	------------

Abramova E. S., Orlov A. A., Makarov K. V.

Controlling the Turning of a Mobile Car-like Robot	134
---	------------

Kabalan A.E.A., Gaiduk A.R., Hamdan N.A.

Model of Parameters of the Flight Route Deviation of Unmanned Aerial Vehicles from a Specified Trajectory	145
--	------------

Andronov V. G., Chuev A. A., Knyazev A. A.

Smart Traffic Light Control System Based on Fuzzy Logic	162
--	------------

Bobyry M. V., Khrapova N. I., Lamonov M. A.

A Method for Tracking the Processes of User Interaction with Objects in Video Sequences.....	177
---	------------

Iakovlev R. N.

The Methodology for Creating the Optimal Set of Spare Equipment in the Organizational and Technological System for Providing Mechanical Assembly at the Enterprises of the Motor-Car Construction Cluster	201
--	------------

Averchenkova E. E., Shabanov A. A.

information of the authors	220
---	------------

Конструкторско-технологическое обеспечение процесса глубокого сверления жаропрочной стали

Е. И. Яцун¹ ✉, С. Н. Могилев¹

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

✉ e-mail: el.yatsun@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Достижение заданных параметров точности глубокого сверления созданием конструкторско-технологического обеспечения процесса глубокого сверления, соответствующего современному уровню развития техники и технологий.

Методы. Анализ станочных и инструментальных систем для обработки глубоких отверстий на основании мониторинга конъюнктуры рынка машин, оборудования, режущего инструмента и оснастки ведущих отечественных и мировых производителей. Синтез технологической системы, обеспечивающей создание изделия, соответствующего мировому уровню качества при максимальной производительности процесса.

Результаты. Создано конструкторско-технологическое обеспечение процесса глубокого сверления высоколегированной жаропрочной стали на оборудовании современного уровня с использованием высокопроизводительного инструмента – ружейного сверла. Предложена оснастка для процесса глубокого сверления – антивибрационный люнет, маслоприемник, зажимной патрон, направляющая втулка. Определены условия дробления сливной стружки, образующейся при глубоком сверлении ружейным сверлом и ее удаление из зоны обработки смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ).

Заключение. На базе оснащения процесса глубокого сверления жаропрочной стали показаны возможности использования как существующего на предприятиях оборудования, так и современного, но дорогостоящего оборудования с учетом серийности производства. Оба этих пути позволяют обеспечить заданную точность и шероховатость обработки. Для реализации процесса глубокого сверления требуется спроектировать специальный инструмент – ружейное сверло с учетом свойств обрабатываемого материала. При реализации процесса глубокого сверления на специализированном оборудовании схема обработки обеспечивается оснасткой станка. При реализации процесса на универсальном оборудовании выбранная схема обработки связана с проектированием и изготовлением оснастки – зажимного патрона, маслоприемника, направляющей втулки. Эти задачи решаются двумя путями: силами специалистов предприятия или привлечением сторонних специализированных организаций по проектированию приспособлений и режущего инструмента. Выбор пути реализации процесса глубокого сверления связан с наличием оборудования, размером партии деталей и технико-экономическими расчетами.

Ключевые слова: глубокое сверление; оборудование; оснастка; ружейное сверло.

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

Для цитирования: Яцун Е.И., Могилев С.Н. Конструкторско-технологическое обеспечение процесса глубокого сверления жаропрочной стали // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 8-18. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-8-18>.

Поступила в редакцию 03.09.2021

Подписана в печать 21.10.2021

Опубликована 20.12.2021

Design and Engineering Support of the Process of Deep Drilling of Heat-resistant Steel

Elena I. Yatsun ¹ ✉, Sergey N. Mogilev ¹

¹ Southwest State University

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

✉ e-mail: el.yatsun@gmail.com

Abstract

Purpose of research. To attain the specified parameters of deep drilling accuracy by creating design and engineering support for the deep drilling process corresponding to the current level of technical and technological development.

Methods. Analysis of machine tools and tool systems for drilling deep holes based on the monitoring of the conditions of machinery, equipment, cutting tools and tooling market of leading domestic and global manufacturers. Synthesis of a process system that ensures the creation of a product that meets the world level of quality with maximum process performance.

Results. The design and engineering support of the process of deep drilling of high-alloy heat-resistant steel using modern equipment with a high-performance tool - a gun drill, was created.

The equipment for the deep drilling process – an anti-vibration rest, an oil receiver, a clamping chuck, a guide bush are proposed. The conditions for the control of flow chips formed during deep drilling with a gun drill and its removal from the processing zone with a cooling mixture are determined.

Conclusion. On the basis of the tooling for deep drilling of heat-resistant steel, the possibilities of using both existing at enterprises equipment and modern but expensive equipment, taking into account the series production, are shown. Both of these ways make it possible to ensure the specified accuracy and roughness of processing.

To implement the deep drilling process, it is required to design a special tool - a gun drill, taking into account the properties of the material being processed. When implementing the deep drilling process applying specialized equipment, the machining pattern is provided by the tooling of the machine. When implementing the process applying universal equipment, the selected machining pattern is connected with the design and manufacture of the tooling – a clamping chuck, an oil receiver, a guide bush. These tasks are implemented in two ways: by the specialists of the enterprise or involving third-party specialized organizations to design attachments and cutting tools. The choice of the way to implement the deep drilling process depends on the availability of equipment, the size of the batch of parts and technical and economic assessment.

Keywords: deep drilling; equipment; tooling; gun drill.

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

For citation: Yatsun E. I., Mogilev S.N. Design and Engineering Support of the Process of Deep Drilling of Heat-resistant Steel. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 8-18 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2021-25-4-8-18](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-8-18).

Received 03.09.2021

Accepted 21.10.2021

Published 20.12.2021

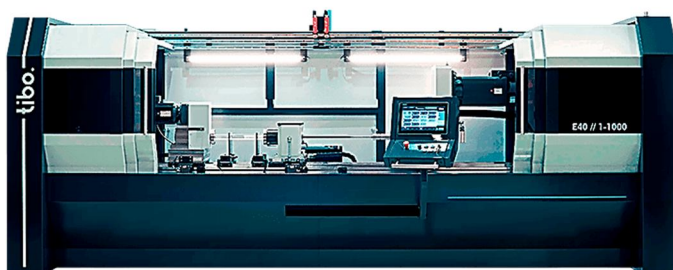
Введение

В настоящее время детали с глубокими отверстиями, такие как роторы и валы турбин, оси и втулки экскаваторов, гильзы, цилиндры и плунжеры прессов, оси и бандажи прокатных станков, трубы буровых установок, кокили для центробежной отливки труб и др. обрабатываются на предприятиях всех основных отраслей промышленности [1, 2, 3].

Трудности обработки отверстий возрастают с увеличением их глубины.

Глубину отверстий принято оценивать отношением L/D_o , где L – длина отверстия, а D_o – его диаметр. Отверстия с $L/D_o > 5$ принято называть глубокими отверстиями и его необходимо обрабатывать методами глубокого сверления на специализированном оборудовании (рис. 1) [4, 5].

Для глубокого сверления используются специальные или универсальные станки (рис. 1) [6-9].



а)



б)

Рис. 1. Оборудование для глубокого сверления: **а** – инновационная модульная система для сверления глубоких отверстий Tibo (Германия); **б** – универсальный токарно-винторезный станок MYDAY 3A (Россия)

Fig. 1. Equipment for deep drilling: **a** – innovative modular system Tibo (Germany) for drilling deep holes; **b** – regular engine lathe MYDAY 3A (Russia)

Материалы и методы

Технологическое обеспечение процесса глубокого сверления состоит в выборе [10-12]:

- технологии глубокого сверления;
- оборудования, соответствующего обрабатываемым заготовкам;
- наладки процесса сверления;

- настройки направления инструмента в начале сверления;
- в определении неоднородности материала обрабатываемого изделия;
- организации удаления стружки из зоны резания;
- способа проверки и настройки жесткости системы с точки зрения направления стебля ружейного сверла в процессе сверления;

– конструкции инструмента, его режущих и направляющих элементов; наиболее соответствующего задаче;

– режимов резания.

Операции глубокого сверления могут выполняться с разными вариантами наладок. Вращение может передаваться только на инструмент или только на деталь.

Возможно также одновременное вращение и сверла, и заготовки; вращение заготовки и осевой подаче сверла (рис. 2).

Направление сверла осуществляется с помощью кондукторной втулки (рис. 3,а) или через предварительно просверленное отверстие меньшего диаметра d на глубину $2d$ (рис. 3, б).

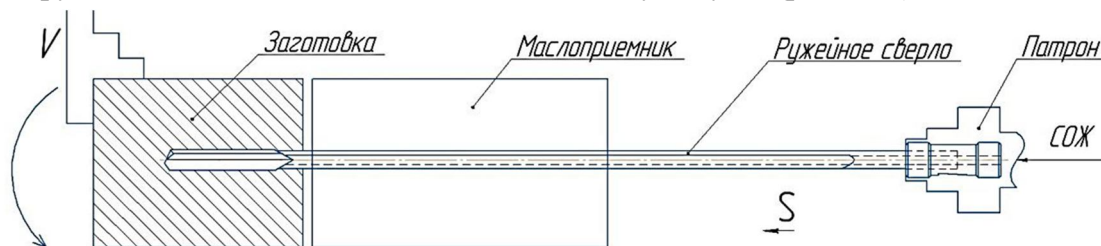


Рис. 2. Движения формообразования при обработке ружейным сверлом

Fig. 2. Shaping movements during gun drilling

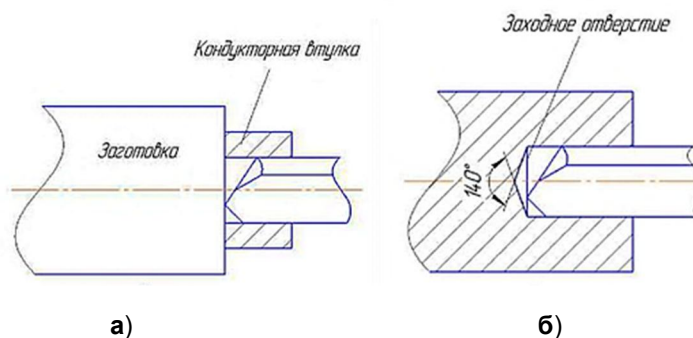


Рис. 3. Способы врезания ружейных сверл: а – с помощью кондукторной втулки; б – с помощью заходного отверстия

Fig. 3. Methods of gun drills plunge: а – with the help of a drilling bush; б – with the help of a lead-in hole

Способы получения заходных отверстий [12, 13, 14]:

а) специальными спиральными сверлами в том числе с внутренним подводом СОЖ;

б) спиральными сверлами с последующим растачиванием;

в) фрезерованием методом круговой интерполяции.

Результаты и их обсуждение

Деталь изготавливается из жаропрочной стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5949-75. Вес заготовки около 900 кг. Перед началом обработки от прутка отрезается образец К для проведения стандартных видов испытаний физико-механических свойств металла (рис. 4).

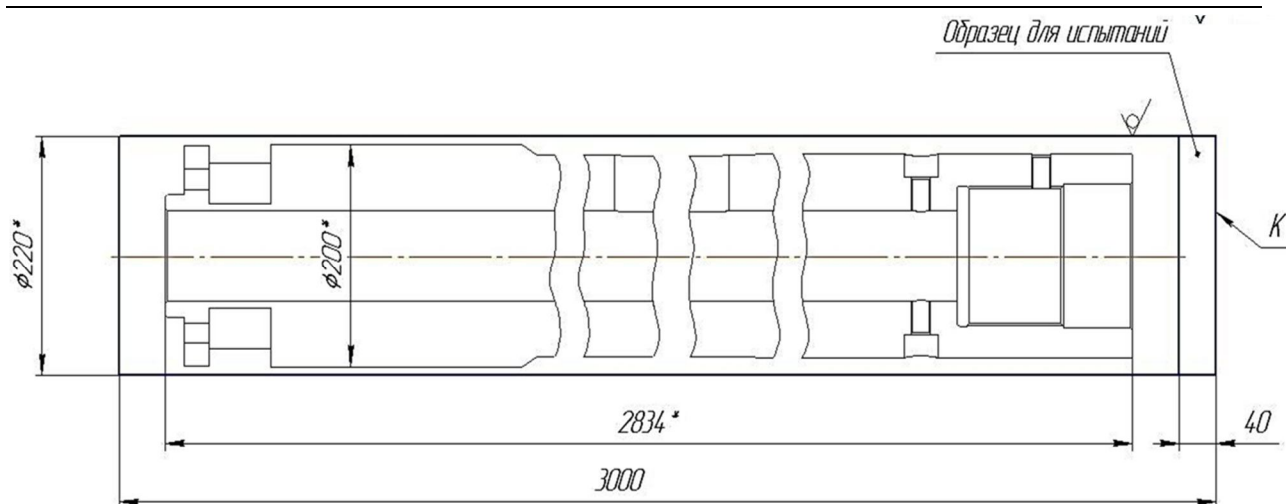


Рис. 4. Заготовка

Fig. 4. Workpiece

Для обработки предлагается использовать универсальный токарно-винторезный станок мод. 1М65-5 (см. рис. 1, б), позволяющий вести обработку заготовок, устанавливаемых над суппортом $\phi 650$ и длину обрабатываемой заготовки 5000 мм. Для подачи СОЖ станок дополняется насосной станцией.

Для направления сверла выбрана схема обработки (см. рис. 2) и разработана наладка станка (рис. 5).

При изготовлении отверстия сверло проходит через направляющую втулку, установленную в маслоприемнике (рис. 6).

Материал втулки – инструментальная легированная сталь 9ХГС ГОСТ5950-2000 для изготовления деталей, к которым предъявляются требования повышенной износостойкости [10, 11]. Твердость HRC 50...62.

Маслоприемник установлен в люнете. Масло для удаления стружки под давлением подается в маслоприемник. На расход СОЖ оказывает влияние диаметр ружейного сверла. Для заданных

условий – диаметр рабочей части сверла 82 мм, длина сверления 2840 мм – давление 1 МПа и расход водной СОЖ 400 л/мин. Тонкость очистки СОЖ 25-30 мкм [15, 16]. Герметичность обеспечивается уплотнением узла резиновыми кольцами ГОСТ 9833-73 и войлочными уплотнениями (см. рис. 5).

Качество обработки ружейным сверлом IT 8...14. Шероховатость $Ra \leq 1,25$ мкм. Увод от оси заготовки не более 0,3 мм/м [10]. По требованиям чертежа детали $\phi 82H12$, допуск +0,35 мм. Шероховатость $Ra_{3,2}$ мкм.

Для обработки детали разработана конструкция ружейного сверла и выбрана геометрия режущей части (рис. 7) [17, 18, 19, 20].

Материал цельной рабочей части – твердый сплав ВК6 ГОСТ 3882-74, материал стебля – 30ХГСА, сортамент – труба прецизионного исполнения ГОСТ 9567 - 75. Твердость стебля сверла HRC47...52 [11].

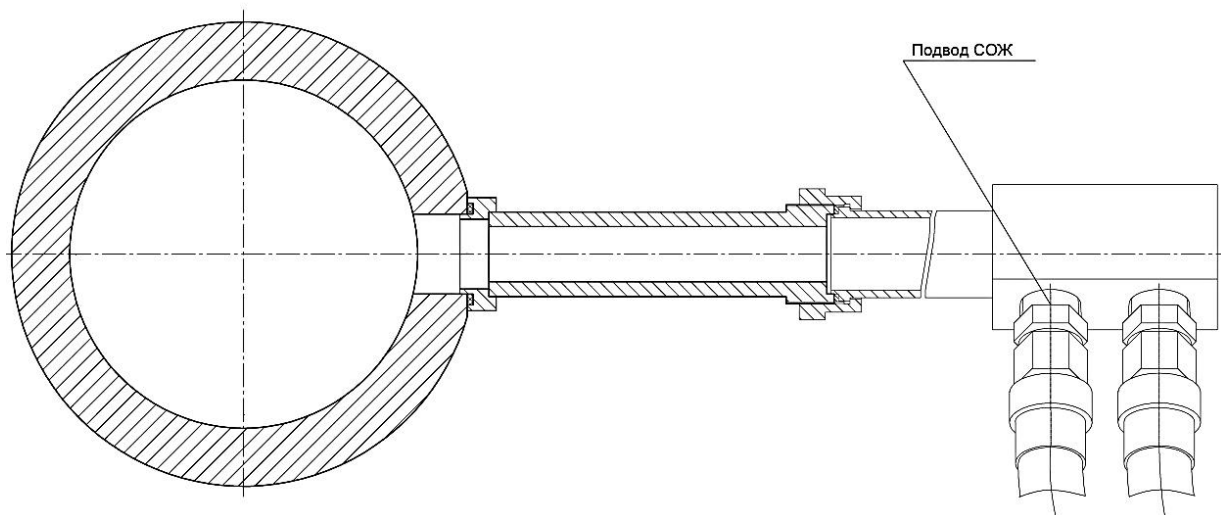


Fig. 5. Deep drilling setting up

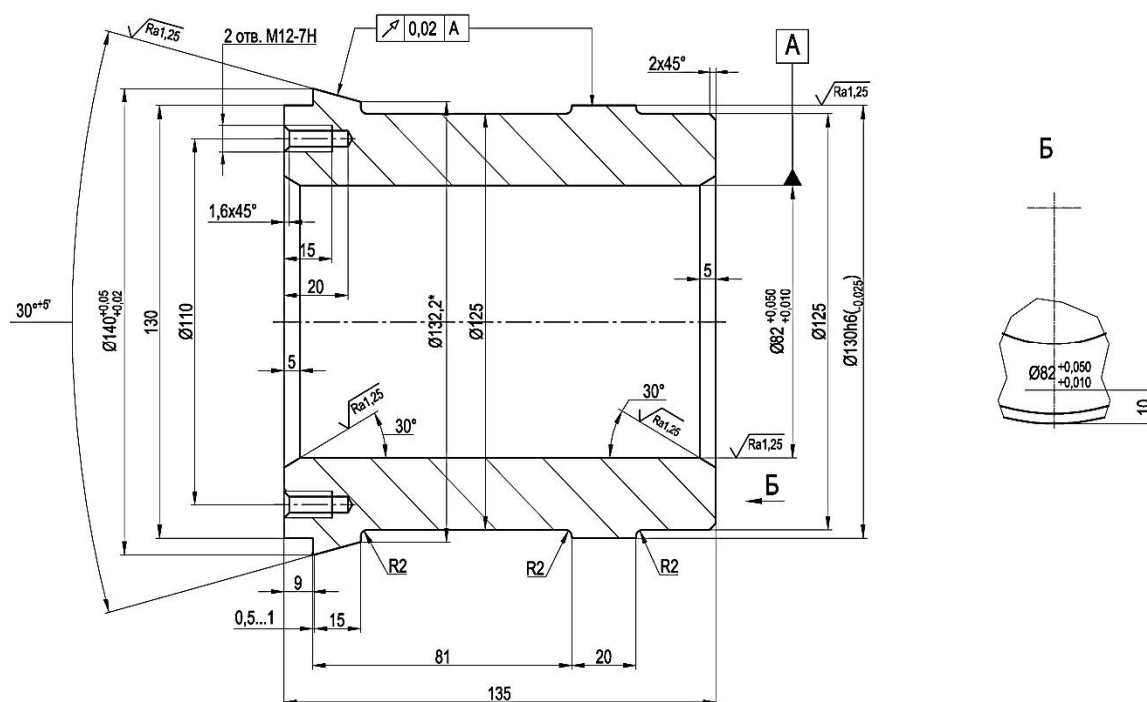
$\sqrt{Rz40}$ (✓)

Рис. 6. Кондукторная втулка

Fig. 6. Drilling bush

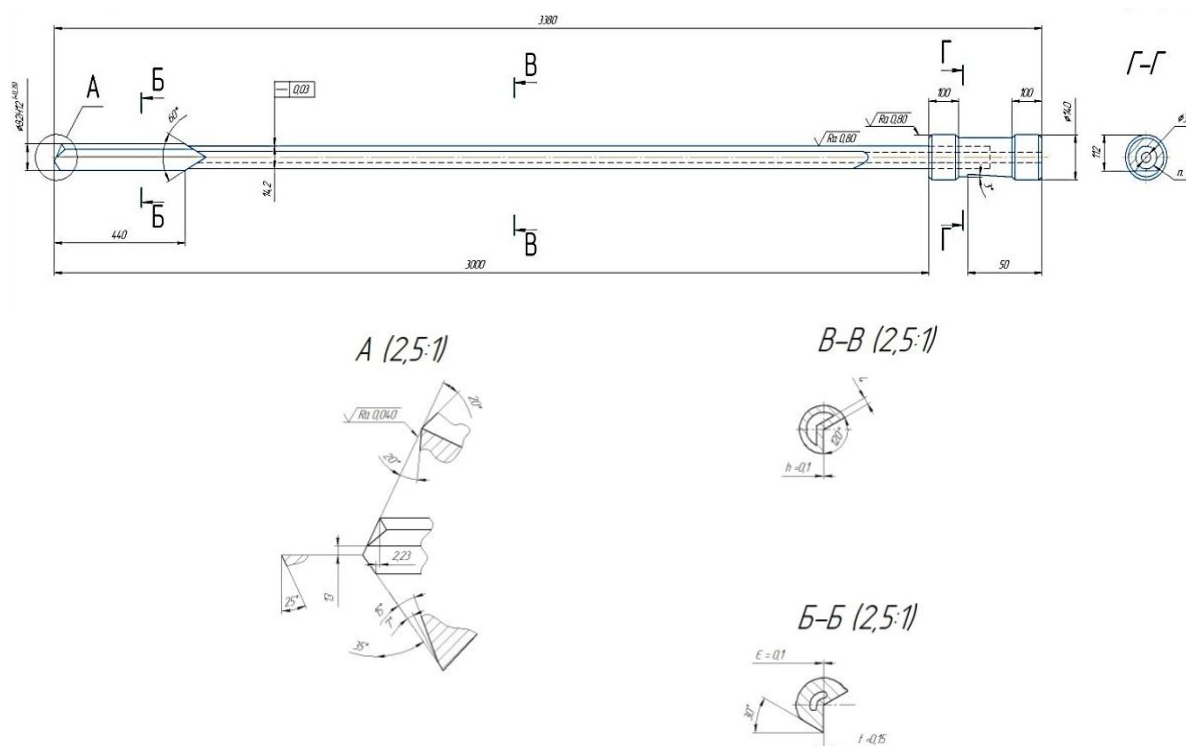


Рис. 7. Ружейное сверло

Fig. 7. Gun drill

Выводы

Конструкторско-технологическое обеспечение процесса глубокого сверления складывается из подготовки про-

изводства для обработки детали – изготовление поддерживающей оснастки, изготовление оснастки для базирования детали на станке, доработки или приобретения инструмента.

Список литературы

1. Троицкий Н.Д. Глубокое сверление. Л.: Машиностроение, 1971. 176 с.
2. Кононенко С.Г. Обработка глубоких отверстий. М.: Машиностроение, 1964. 41 с.
3. Минков М.А. Технология обработки глубоких точных отверстий. М.-Л.: Машиностроение, 1965. 176 с.
4. Туктанов А.Г. Технология производства стрелково-пушечного и артиллерийского оружия. М.: Машиностроение, 2007. 375 с.
5. Кожевников Д.В. Современная технология и инструмент для обработки глубоких отверстий: обзор. М.: НИИМАШ, 1981. 60 с.
6. Кирсанов С.В. Станки для обработки глубоких отверстий // Справочник. Инженерный журнал. 2001. №8(53). С.46-49.
7. Гольдрах Г.М., Джугурян Т.Г., Капительман Л.В. Станки для глубокого сверления // Техника машиностроения. 1966. №3 (9). С. 39-41.
8. Губергриц Л.И., Дроздов Ф.М. Станки для сверления и растачивания глубоких отверстий // Станки и инструмент. 1989. №4. С. 2-4.
9. Липатов А.Н. Глубокое сверление на станках с ЧПУ // Станки и инструмент, 1991. №5. С.29-31.
10. Обеспечение прямолинейности каналов при производстве трубных заготовок А.В. Соколов, М.Д. Вяткин, И.Б. Шендеров и др. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2000. №12. С. 48-49.
11. Литвинов Л.П. Вибросверление глубоких отверстий // Вестник машиностроения. 1990. №5. С. 22-24.
12. Кириллин Б.Н. Вибрационное сверление ружейными сверлами// Станки и инструмент. 1968. №5. С. 22-24.
13. Яцун Е.И., Анисеева Н.П., Карнаухов И.С. Повышение эффективности обработки длинномерных валов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; №23(1): 43-53. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-43-53>
14. Увеличение динамической жесткости расточных оправок / Е.И. Яцун, О.С. Зубкова, А.В. Гордейков, Д.А. Зубков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 3 (341). С 45-50.

15. Кирсанов С.В Смазочно-охлаждающие технологические средства, применяемые при обработке глубоких отверстий // Справочник. Инженерный журнал. 2001. №6(51). С.5-7.
16. Буяновский И.А. К оценке нижних температурных пределов действия химически активных присадок // Трение и износ, 1981. Т. 2, №4. С. 703-707.
17. Кирсанов С.В. Современные конструкции инструментов для сверления и растачивания глубоких отверстий // Справочник. Инженерный журнал. 2005. №2(95). С.46-53.
18. Инструменты для обработки точных отверстий / С.В. Кирсанов, В.А. Гречишников, А.Г. Схиртладзе, В.И. Кокарев. М.: Машиностроение, 2005. 336 с.
19. Яцун Е.И. Инструментальные системы для обработки деталей гидроцилиндров. Курск, 2020. 117 с.
20. Инструментальное обеспечение процесса механической обработки твердыми сплавами и композитами / Е.И. Яцун, В.В. Малыхин, О.С. Зубкова, С.Г. Новиков. Курск, 2016. 224 с.

References

1. Troitsky N.D. *Glubokoe sverlenie* [Deep drilling]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1971. 176 p.
2. Kononenko S.G. *Obrabotka glubokikh otverstii* [Processing of deep holes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964. 41 p.
3. Minkov M.A. *Tekhnologiya obrabotki glubokikh tochnykh otverstii* [Technology of processing deep precise holes]. Moscow-Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1965. 176 p.
4. Tuktanov A.G. *Tekhnologiya proizvodstva strelkovo-pushechnogo i artilleriiskogo oruzhiya* [Technology of production of small-gun and artillery weapons]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 375 p.
5. Kozhevnikov D.V. *Sovremennaya tekhnologiya i instrument dlya obrabotki glubokikh otverstii* [Modern technology and tools for processing deep holes]. Moscow, NIIMASH Publ., 1981. 60 p.
6. Kirsanov S.V. *Stanki dlya obrabotki glubokikh otverstii* [Machines for processing deep holes. Guide.]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal = Engineering Magazine, Engineering Journal*, 2001, no.8(53), pp.46-49.
7. Goldrakh G.M., Dzhuguryan T.G., Kapitelman L.V. *Stanki dlya glubokogo sverleniya* [Machines for deep drilling]. *Tekhnika mashinostroeniya = Machinery Engineering*, 1966, no. 3 (9), pp. 39-41.
8. Gubergrits L.I., Drozdov F.M. *Stanki dlya sverleniya i rastachivaniya glubokikh otverstii* [Machines for drilling and boring deep holes]. *Stanki i instrument = Machines and Tools*, 1989, no. 4, pp. 2-4.

9. Lipatov A.N. Glubokoe sverlenie na stankakh s ChPU [Deep drilling on CNC machines]. *Stanki i instrument = Machines and Tools*, 1991, no. 5, pp.29-31.
10. Sokolov A.V., Vyatkin M.D., Shenderov I.B., etc. Obespechenie pryamolineinosti kanalov pri proizvodstve trubnykh zagotovok [Ensuring the straightness of channels in the production of pipe blanks]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie = Chemical and Oil and Gas Engineering*, 2000, no.12, pp. 48-49.
11. Litvinov L.P. Vibrosverlenie glubokikh otverstii [Vibration drilling of deep holes]. *Vestnik mashinostroeniya = Bulletin of Mechanical Engineering*, 1990, no.5, pp. 22-24.
12. Kirillin B.N. Vibratsionnoe sverlenie ruzheinymi sverlami [Vibration drilling with rifle drills]. *Stanki i instrument = Machines and Tools*, 1968, no. 5, pp. 22-24.
13. Yatsun E. I., Anikeeva N. P, Karnaukhov I. S. Increase in Processing Efficiency of Long-Length Shafts. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019; 23(1): 43-53 (in Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-43-53>.
14. Yatsun E.I., Zubkova O.S., Gordeykov A.V., Zubkov D.A. Uvelichenie dinamicheskoi zhestkosti rastochnykh opravok [Increasing the dynamic rigidity of boring mandrels]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2020, no. 3 (341), pp. 45-50.
15. Kirsanov S.V. Smazочно-okhlazhdayushchie tekhnologicheskie sredstva, primenyaemye pri obrabotke glubokikh otverstii [Lubricating and cooling technological means used in the processing of deep holes]. *Guide. Inzhenernyi zhurnal = Engineering Journal*, 2001, no.6(51), pp.5-7.
16. Buyanovskiy I.A. K otsenke nizhnikh temperaturnykh predelov deistviya khimicheskii aktivnykh prisadok [To the assessment of the lower temperature limits of the action of chemically active additives]. *Trenie i iznos = Friction and Wear*, 1981, vol. 2, no. 4, pp. 703-707.
17. Kirsanov S.V. Sovremennye konstruktsii instrumentov dlya sverleniya i rastachivaniya glubokikh otverstii [Modern designs of tools for drilling and boring deep holes]. *Guide. Inzhenernyi zhurnal = Engineering Journal*, 2005, no.2(95), pp.46-53.
18. Kirsanov S.V., Grechishnikov V.A., Skhirtladze A.G., Kokarev V.I. *Instrumenty dlya obrabotki tochnykh otverstii* [Tools for processing precise holes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 336 p.
19. Yatsun E.I. *Instrumental'nye sistemy dlya obrabotki detalei gidrotsilindrov* [Tool systems for processing hydraulic cylinder parts]. Kursk, 2020. 117 p. (In Russ.)
20. Yatsun E.I., Malykhin V.V., Zubkova O.S., Novikov S.G. *Instrumental'noe obespechenie protsessa mekhanicheskoi obrabotki tverdymi splavami i kompozitami* [Instrumental support of the machining process with hard alloys and composites]. Kursk, 2016. 224 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Яцун Елена Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: el.yatsun@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7633-6489>

Elena I. Yatsun, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Machine-building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: el.yatsun@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7633-6489>

Могилев Сергей Николаевич, студент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: varior88@mail.ru

Sergey N. Mogilev, Student Machine-building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: varior88@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-19-28>



Исследование процесса глубокого сверления нержавеющей стали

Е.И. Яцун ¹ ✉, О.С. Зубкова ¹, С.Н. Могилев ¹

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

✉ e-mail: el.yatsun@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Экспериментальное определение влияния режимов глубокого сверления высоко-легированной стали на составляющие сил резания. Получение отверстий в сплошном материале при глубине отверстия, равной или большей десяти диаметрам отверстия, относится к операциям глубокого сверления. Для сверления применяется специальный инструмент – сверла для глубокого сверления – эжекторные, пушечные, ружейные. Применяется универсальное или специальное оборудование, оснастка – подвижные или неподвижные люнеты, направляющие втулки. Для достижения поставленной цели необходимо выбрать оборудование; тип инструмента для глубокого сверления; вид наладки; создать модель сил, действующих на режущую часть инструмента в процессе глубокого сверления; оценить степень влияния режимов обработки на силы резания.

Методы. Исследования основаны на положениях теории резания, технологии машиностроения, планирования эксперимента и регрессионного анализа.

Результаты. На основании положений технологии машиностроения разработана наладка на глубокое сверление при вращающейся заготовке и не вращающемся сверле, которому сообщается только осевая подача. Определен режущий инструмент для выполнения операции глубокого сверления – ружейное сверло. Для такой схемы обработки создана модель и рассчитаны экспериментальные силы резания. По результатам расчетов определено, что наибольшее влияние на составляющие силы резания в заданном диапазоне режимов резания оказывает скорость осевой подачи инструмента.

Заключение. Силы резания, возникающие при глубоком сверлении, достигают значительных величин. Полиномиальные уравнения, полученные в результате исследования, позволяют оценить степень влияния режимов обработки на силы резания, рассчитать силы резания для дальнейшего расчета стрелы прогиба стебля ружейного сверла.

Ключевые слова: ружейное сверло; глубокое сверление; силы резания; подача; скорость резания.

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

Для цитирования: Яцун Е.И., Зубкова О.С., Могилев С.Н. Исследование процесса глубокого сверления нержавеющей стали // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 19-28. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-19-28>.

Поступила в редакцию 27.09.2021

Подписана в печать 14.10.2021

Опубликована 20.12.2021

Investigation of the Process of Deep Drilling of Stainless Steel

Elena I. Yatsun ¹ ✉, Oksana S. Zubkova ¹, Sergey N. Mogilev ¹

¹ Southwest State University

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

✉ e-mail: el.yatsun@gmail.com

Abstract

Purpose of research. Experimental assessment of the effect of deep drilling modes for high-alloy steel on the components of cutting forces. Making holes in a solid material with a hole depth equal to or greater than ten hole diameters refers to deep drilling operations. For drilling, special tools are used – drills for deep drilling - ejector, cannon, gun drills. Universal or special equipment is applied, the tooling includes travelling or fixed rests, guide bushes.

To achieve this goal, it is necessary to choose equipment: type of tool for deep drilling, type of setting; create a model of the forces acting on the cutting part of the tool during deep drilling; evaluate the degree of influence of processing modes on cutting forces.

Methods. The research is based on the cutting theory provisions, mechanical engineering technology, experiment planning and regression analysis.

Results. Based on the provisions of mechanical engineering technology, the setting up for deep drilling with a rotating workpiece and a non-rotating drill, which is imparted only by the axial feed, was developed. A cutting tool for performing a deep drilling operation is defined – a gun drill. A pattern was created for such a processing scheme and experimental cutting forces were calculated. According to the results of the calculations, it is determined that the greatest influence on the components of the cutting force in a given range of cutting modes is exerted by the axial feed rate of the tool.

Conclusion. The cutting forces that occur during deep drilling reach significant values. The polynomial equations obtained as a result of the study allow us to assess the degree of influence of processing modes on cutting forces, calculate cutting forces for further calculation for the sag of the stem of a gun drill.

Keywords: gun drill; deep drilling; cutting forces; feed; cutting speed.

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

For citation: Yatsun E. I., Zubkova O.S., Mogilev S.N. Investigation of the Process of Deep Drilling of Stainless Steel. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 19-28 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-19-28>.

Received 27.09.2021

Accepted 14.10.2021

Published 20.12.2021

Введение

В настоящее время для сверления глубоких отверстий глубиной до $250d$, где d – диаметр сверла, широкое применение находят ружейные сверла [1-5]. При использовании этих инструментов на направляющие станины станка устанавливают дополнительные опоры –

люнеты, чтобы стембель инструмента, как наименее жесткий элемент технологической системы, под действием сил резания не деформировался. Прогиб корпуса инструмента - стембля может вызвать его касание поверхности обработанного отверстия и, как следствие, поломку сверла [6, 7]. Сверление жаропрочных сталей сопровождается обра-

зованием сильно деформированной лентообразной стружки, которая затрудняет подвод охлаждающей жидкости и снижает стойкость сверла [8]. Сверление жаропрочных сталей осуществляют при обильном охлаждении 5%-ной эмульсией или водным раствором хлористого бария с добавкой 1% нитрата натрия [9, 10].

Направление сверла в начале обработки обеспечивается специальной кондукторной втулкой или предварительным сверлением отверстия меньшего диаметра на небольшую глубину [11-14].

При сверлении глубоких отверстий ружейными сверлами создаются сложные условия для отвода стружки из зо-

ны обработки, что может привести к уводу оси сверла и даже поломке инструмента [15]. Для дробления стружки применяются специальные формы твердосплавных пластин со стружколомающими канавками и обильная подача смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) под высоким давлением для вывода стружки из зоны резания.

Материалы и методы

Деталь «Пробка» (рис. 1) представляет собой вал со сквозным отверстием. Деталь применяется в атомной промышленности.

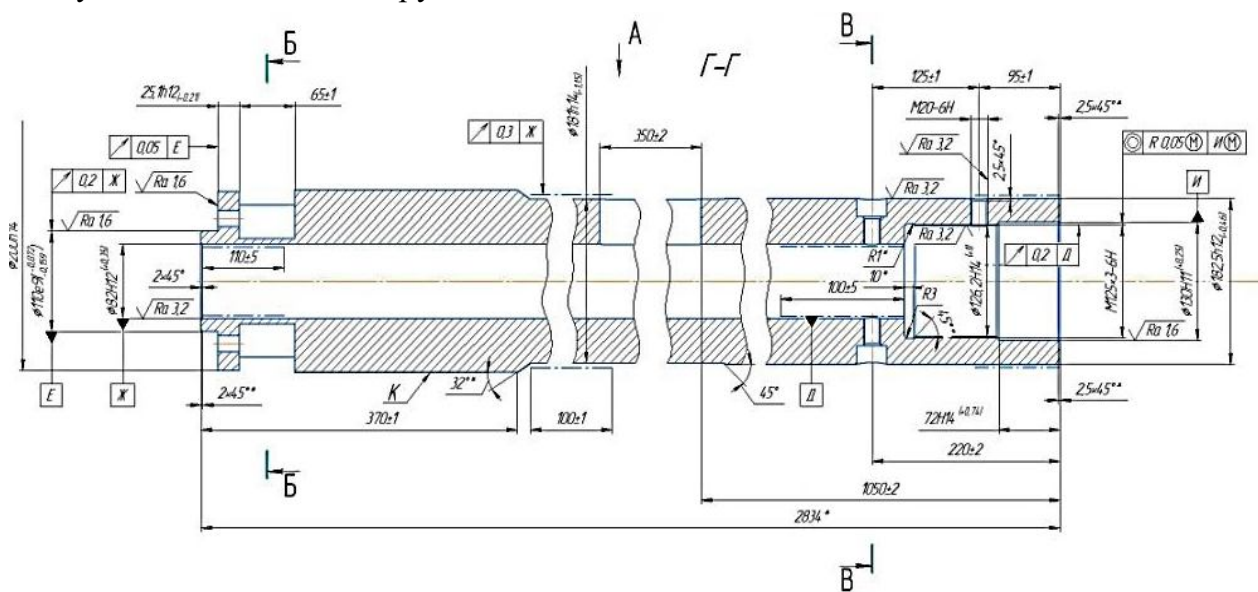


Рис. 1. Конструкция детали «Пробка»

Fig. 1. Design the "Plug" part

Материал детали – сталь 12X18H10T ГОСТ 5949-75 является высокоуглеродистой стойкой к коррозии, немагнитной, титаносодержащей сталью. Группа аустенитов. Относится к сложнолегированным сплавам [1]. На сегодняшний день она представляет собой самую используемую

и распространенную сталь из всех марок нержавеющей сталей [2, 3]. Твердость материала HB 10 -1 = 179 МПа.

Размер заготовки – стандартный прокат:

$$\text{Круг} \frac{220 - \text{В1 ГОСТ 2590-2006}}{12\text{X}2\text{X}18\text{H1 ГОСТ 5949-75}}.$$

Содержание операции: сверлить отверстие $\varnothing 82H12^{(+0,35)}$ мм на глубину 2840^{+3} мм (рис. 2).

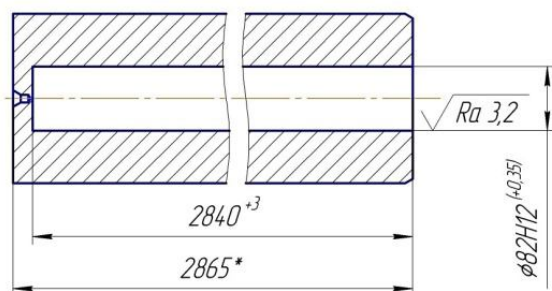


Рис. 2. Операционный эскиз

Fig. 2. Operational drawing

Сверление глубоких отверстий в металле обычно выполняют в такой последовательности [6, 7, 16]:

Производится сверление в детали подготовительного отверстия спиральным сверлом с меньшим диаметром и допуском H7. Сверление на длину, равную двум диаметрам инструмента (рис. 3).

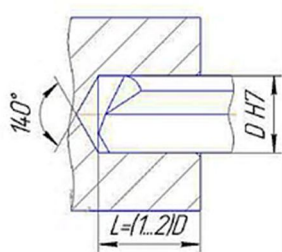


Рис. 3. Предварительное сверление

Fig. 3. Pre-drilling

Ружейное сверло на пониженных оборотах перемещают к торцу детали. Сверление на длину, равную одной трети длины отверстия. Используется неподвижный люнет.

Затем ружейное сверло (рис. 4) работает на расчетных по технологии оборотах с подводом СОЖ. Производится сверление детали на необходимую глубину без вывода инструмента из отверстия.

Режимы резания:

– диаметр сверления $\varnothing 70H7$. Предварительное сверление $t = 35$ мм; $L=70$ мм. $S=0,04$ мм/об.; $V=180$ м/мин.; $n=1000$ мин.⁻¹;

– диаметр сверления $\varnothing 82H12$. Основное сверление $t = 41$ мм; $L=700$ мм. $S=0,14$ мм/об.; $V=375$ м/мин.; $n=1450$ мин.⁻¹; $M_{кр}=360$ Н·м; $P_o=8,7$ кН.

Ружейное сверло состоит из режущей твердосплавной рабочей части и стального трубчатого стебля с V-образной канавкой и хвостовика (рис.4) [17, 18, 19 - 22]. СОЖ подаётся в зону резания через сквозное отверстие внутри сверла.

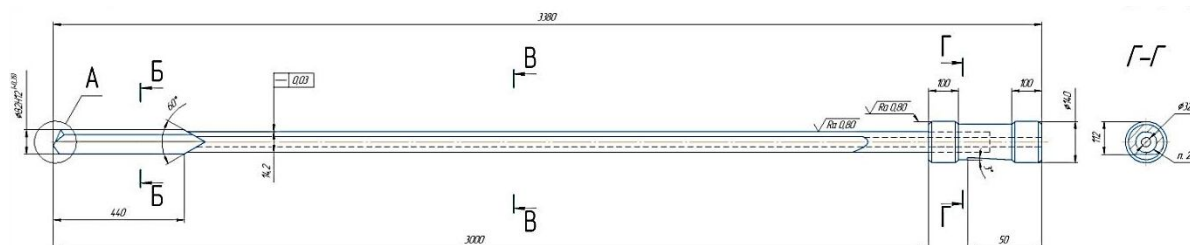


Рис. 4. Ружейное сверло

Fig. 4. Gun drill

Стружка отводится по V-образной канавке в стружкоприемник и далее в стружкосборник станка.

Результаты и их обсуждение

В процессе сверления на ружейное сверло действуют: крутящий момент $M_{кр}$, осевая сила P_o , и изгибающие моменты $M_{из}$ [2, 16] (рис. 5).

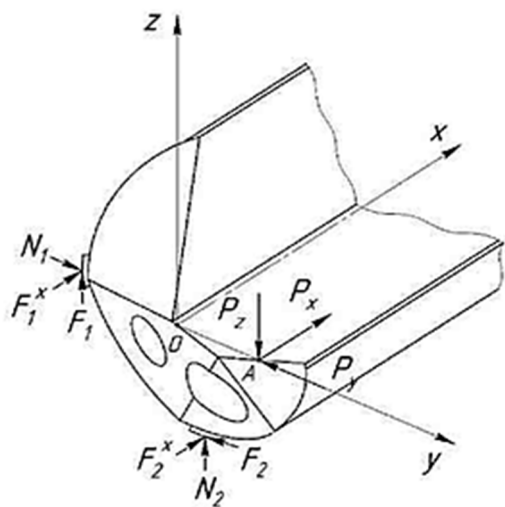


Рис. 5. Схема сил и моментов, действующих на режущую кромку ружейного сверла

Fig. 5. Diagram of forces and moments acting on the cutting edge of the gun drill

У ружейного сверла главная режущая кромка расположена эксцентрично относительно оси X инструмента, поэтому результирующая сила резания приложена в точке A и её можно разложить на составляющие P_z , P_x , P_y (см. рис. 5) [2].

Исходными данными для расчета по приведенным формулам являются: d – диаметр сверла; P_z , P_x , P_y – составляющие силы резания; μ – коэффициент трения на направляющих вокруг оси ox ; μ_x – коэффициент трения на направля-

ющих параллельно оси ox ; h – расстояние от оси ox до точки A; α – угол расположения опорной направляющей относительно оси oz (рис. 6) [2].

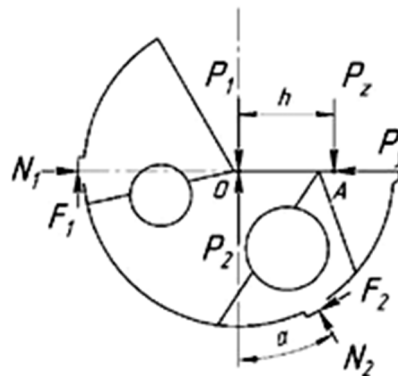


Рис. 6. Расчетная схема

Fig. 6. Design model

Из этих данных наибольшие трудности вызывает определение составляющих силы резания P_z , P_x , P_y , так как определить их экспериментально в процессе сверления из-за влияния трения на направляющих невозможно [2]. Поэтому на практике процесс сверления ружейными сверлами моделируют сверлением на токарно-винторезном станке заготовок, диаметр которых равен диаметру сверла, исключая контакт направляющих инструмента с поверхностью обработанного отверстия [2, 7, 11, 16]. Для этой цели использовали токарно-винторезный станок мод. 1М65-5. Составляющие силы резания измеряли трехкомпонентным динамометром мод. 9257ВА. Резание осуществляли с использованием смазочно-охлаждающей жидкости.

Результаты измерений представлены в виде графика (рис. 8) и полиномиальных уравнений [2, 3]:

$$P_x = 1530,5 \cdot d^{0,55} \cdot S^{0,71} = 1530,5 \cdot 82^{0,55} \times \\ \times 0,14^{0,71} = 4323 \text{ (Н)} = 4,3 \text{ кН.}$$

Для снижения сил резания уменьшаем подачу. Принимаем $S=0,04$ мм/об.

$$P_z = 1505 \cdot d^{0,65} \cdot S^{0,7878} = 1505 \cdot 82^{0,65} \times \\ \times 0,04^{0,78} = 2,1 \text{ (кН).}$$

$$P_y = 2985 \cdot d^{0,17} \cdot S^{0,89} = 2985 \cdot 82^{0,17} \times \\ \times 0,04^{0,89} = 0,3 \text{ (кН).}$$

$$P_x = 1530,5 \cdot d^{0,55} \cdot S^{0,71} = 1530,5 \cdot 82^{0,55} \times \\ \times 0,04^{0,71} = 1728,9 \text{ (Н)} = 1,7 \text{ кН.}$$

Расчет сверл на продольный изгиб производится по зависимости [5, 16]:

$$P_{кр} = \frac{2 \cdot E \cdot J_{\min} \cdot \pi^2}{l^2 \cdot \left(1 + \frac{J_{\min}}{J_{\max}}\right)},$$

где E – модуль упругости при растяжении, мм⁴;

J_{\min} и J_{\max} – наибольший и наименьший моменты инерции сечения сверла.

$$P_{кр} = \frac{2 \cdot 60000 \cdot 155275 \cdot 3,14^2}{3100^2 \cdot \left(1 + \frac{155275,6}{1024851}\right)} = 16,6 \text{ (кН)}$$

Продольный изгиб наблюдается при нагружении сверла осевой силой P_o , критические напряжения равны [5]:

$$\sigma_{кр} = \frac{P_o}{F},$$

где F – площадь поперечного сечения стебля сверла, мм². $F=1432$ мм².

Расчетное значение осевой силы $P_o = 8,7$ кН. Крутящий момент $M_{кр} = 360$ Н·м.

$$\sigma_{кр} = \frac{870}{1432} = 0,6 \text{ (кг/мм}^2\text{)}.$$

$$\sigma_{и} = 144 \dots 165 \text{ кг/мм}^2 \text{ [5].}$$

Экспериментально полученные значения значительно меньше допустимых величин.

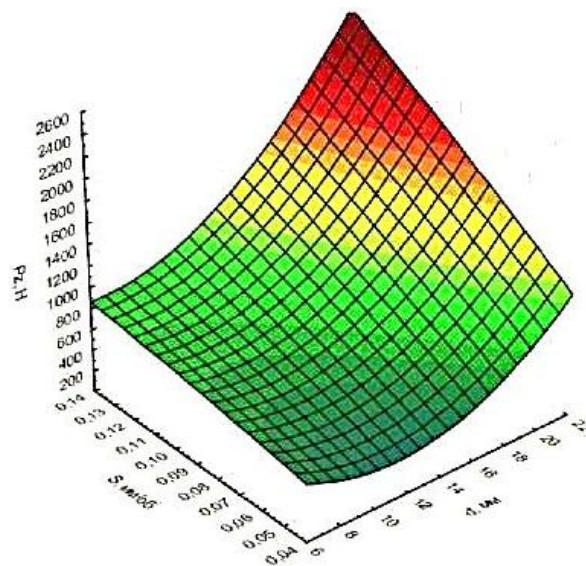


Рис. 8. Влияние подачи S и диаметра ружейного сверла d на составляющую силы резания P_z при сверлении стали 12Х18Н10Т

Fig. 8. The effect of the feed S and the diameter of the gun drill d on the component of the cutting force P_z when drilling 12Х18Н10Т steel

Используемая модель схемы сил и моментов, действующих на ружейное сверло, экспериментально полученные зависимости планируется использовать в дальнейших исследованиях при расчете стрелы прогиба ружейного сверла методом конечных элементов.

Выводы

Полученные зависимости показывают влияние составляющих системы резания на силы резания. Из полученных данных следует, что наибольшее влияние на силы резания оказывает скорость подачи инструмента. Значения расчетных сил резания и полученных экспериментально могут существенно отличаться. Это связано с состоянием конкретной технологической системы ста-

нок – приспособление – инструмент – деталь. Поэтому для дальнейших исследований стрелы прогиба стебля ружейного сверла будут использованы значения сил резания, полученные экспериментально.

Список литературы

1. Троицкий Н.Д. Глубокое сверление. Л.: Машиностроение, 1971. 176 с.
2. Кирсанов С.В. Современные конструкции инструментов для сверления и растачивания глубоких отверстий // Справочник. Инженерный журнал. 2005. №2(95). С. 46-53.
3. Инструменты для обработки точных отверстий / С.В. Кирсанов, В.А. Гречишников, А.Г. Схиртладзе, В.И. Кокарев. М.: Машиностроение, 2005. 336 с.
4. Черничкин С.А. Кольцевое сверление и обработка глубоких отверстий. М.: Машиностроение, 1975. 240 с.
5. Кононенко С.Г. Обработка глубоких отверстий. М.: Машиностроение, 1964. 41 с.
6. Минков М.А. Технология обработки глубоких точных отверстий. М.-Л.: Машиностроение, 1965. 176 с.
7. Туктанов А.Г. Технология производства стрелково-пушечного и артиллерийского оружия. М.: Машиностроение, 2007. 375 с.
8. Кожевников Д.В. Современная технология и инструмент для обработки глубоких отверстий: обзор. М.: НИИМАШ, 1981. 60 с.
9. Кирсанов С.В. Смазочно-охлаждающие технологические средства, применяемые при обработке глубоких отверстий // Справочник. Инженерный журнал. 2001. №6(51). С. 5-7.
10. Буяновский И.А. К оценке нижних температурных пределов действия химически активных присадок // Трение и износ. 1981. Т. 2, №4. С. 703-707.
11. Кирсанов С.В. Станки для обработки глубоких отверстий // Справочник. Инженерный журнал. 2001. №8(53). С. 46-49.
12. Гольдрах Г.М., Джугурян Т.Г., Капительман Л.В. Станки для глубокого сверления // Техника машиностроения. 1966. №3 (9). С. 39-41.
13. Губергриц Л.И., Дроздов Ф.М. Станки для сверления и растачивания глубоких отверстий // Станки и инструмент. 1989. №4. С. 2-4.
14. Липатов А.Н. Глубокое сверление на станках с ЧПУ // Станки и инструмент, 1991. №5. С. 29-31.
15. Соколов А.В., Вяткин М.Д., Шендеров И.Б. и др. Обеспечение прямолинейности каналов при производстве трубных заготовок // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2000. №12. С. 48-49.
16. Пентегов О.Л. Влияние величины нулевого стержня и углов в плане на усилие резания при сверлении однокромочными сверлами // Вопросы производительности

обработки металлов резанием. Труды Новочеркасского политехнического института. 1967. Т. 165. С. 93-95.

17. Литвинов Л.П. Вибросверление глубоких отверстий // Вестник машиностроения. 1990. №5. С. 22-24.

18. Кириллин Б.Н. Вибрационное сверление ружейными сверлами // Станки и инструмент. 1968. №5. С. 22-24.

19. Инструментальное обеспечение процесса механической обработки твердыми сплавами и композитами / Е.И. Яцун, В.В. Малыхин, О.С. Зубкова, С.Г. Новиков. Курск, 2016. 224 с.

20. Яцун Е.И. Инструментальные системы для обработки деталей гидроцилиндров. Курск, 2020. 117 с.

21. Яцун Е.И., Аникеева Н.П., Карнаухов И.С. Повышение эффективности обработки длинномерных валов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; №23(1): 43-53. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-43-53>.

22. Увеличение динамической жесткости расточных оправок / Е.И. Яцун, - О.С. Зубкова, А.В. Гордейков, Д.А. Зубков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 3 (341). С. 45-50.

References

1. Troitsky N.D. *Glubokoe sverlenie* [Deep drilling]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1971. 176 p.

2. Kirsanov S.V. *Sovremennye konstruksii instrumentov dlya sverleniya i rastachivaniya glubokikh otverstii* [Modern designs of tools for drilling and boring deep holes]. *Guide. Inzhenernyi zhurnal = Engineering Journal*, 2005, no.2(95), pp.46-53.

3. Kirsanov S.V., Grechishnikov V.A., Skhirtladze A.G., Kokarev V.I. *Instrumenty dlya obrabotki tochnykh otverstii* [Tools for processing precise holes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 336 p.

4. Chernichkin S.A. *Kol'tsevoe sverlenie i obrabotka glubokikh otverstii* [Ring drilling and processing of deep holes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 240 p.

5. Kononenko S.G. *Obrabotka glubokikh otverstii* [Processing of deep holes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964. 41 p.

6. Minkov M.A. *Tekhnologiya obrabotki glubokikh tochnykh otverstii* [Technology of processing deep precise holes]. Moscow-Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1965, 176 p.

7. Tuktanov A.G. *Tekhnologiya proizvodstva strelkovo-pushechnogo i artilleriiskogo oruzhiya* [Technology of production of small-gun and artillery weapons]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 375 p.

8. Kozhevnikov D.V. *Stanki dlya obrabotki glubokikh otverstii* [Modern technology and tools for processing deep holes]. Moscow, NIIMASH Publ., 1981. 60 p.

9. Kirsanov S.V. Smazочно-okhlazhdayushchie tekhnologicheskie sredstva, primenyaemye pri obrabotke glubokikh otverstii [Lubricating and cooling technological means used in the processing of deep holes]. *Guide. Inzhenernyi zhurnal = Engineering Journal*, 2001, no. 6(51), pp.5-7.

10. Buyanovskiy I.A. K otsenke nizhnikh temperaturnykh predelov deistviya khimicheskii aktivnykh prisadok [To the assessment of the lower temperature limits of the action of chemically active additives]. *Trenie i iznos = Friction and Wear*, 1981, vol. 2, no. 4, pp. 703-707.

11. Kirsanov S.V. Stanki dlya obrabotki glubokikh otverstii [Machines for processing deep holes. Guide.]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal = Engineering Magazine, Engineering Journal*, 2001, no.8(53), pp.46-49.

12. Goldrakh G.M., Dzhuguryan T.G., Kapitelman L.V. Stanki dlya glubokogo sverleniya [Machines for deep drilling]. *Mashinostroenie = Mechanical Engineering*, 1966, no. 3 (9), pp. 39-41.

13. Gubergits L.I., Drozdov F.M. Stanki dlya sverleniya i rastachivaniya glubokikh otverstii [Machines for drilling and boring deep holes]. *Stanki i instrument = Machines and Tools*, 1989, no. 4, pp. 2-4.

14. Lipatov A.N. Glubokoe sverlenie na stankakh s ChPU [Deep drilling on CNC machines]. *Stanki i instrument = Machines and Tools*, 1991, no. 5, pp. 29-31.

15. Sokolov A.V., Vyatkin M.D., Shenderov I.B., etc. Obespechenie pryamolineinosti kanalov pri proizvodstve trubnykh zagotovok [Ensuring the straightness of channels in the production of pipe blanks]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie = Chemical and Oil and Gas Engineering*, 2000, no. 12, pp. 48-49.

16. Pentegov O.L. Vliyanie velichiny nulevogo sterzhnya i uglov v plane na usilie rezaniya pri sverlenii odnokromochnymi sverlami [Influence of the zero rod size and angles in the plan on the cutting force when drilling with single-edged drills]. *Voprosy proizvoditel'nosti obrabotki metallov rezaniem. Trudy Novocherkasskogo politekhnicheskogo instituta = Productivity Issues of Metal Cutting. Proceedings of the Novocherkassk Polytechnic Institute*, 1967, vol. 165, pp. 93-95.

17. Litvinov L.P. Vibrosverlenie glubokikh otverstii [Vibration drilling of deep holes]. *Vestnik mashinostroeniya = Bulletin of Mechanical Engineering*, 1990, no.5, pp. 22-24.

18. Kirillin B.N. Vibratsionnoe sverlenie ruzheinymi sverlami [Vibration drilling with rifle drills]. *Stanki i instrument = Machines and Tools*, 1968, no. 5, pp. 22-24.

19. Yatsun E.I., Malykhin V.V., Zubkova O.S., Novikov S.G. *Instrumental'noe obespechenie protsessa mekhanicheskoi obrabotki tverdymi splavami i kompozitami* [Instrumental support of the machining process with hard alloys and composites]. Monograph. Kursk, 2016. 224 p.

20. Yatsun E.I. *Instrumental'nye sistemy dlya obrabotki detalei gidrotsilindrov* [Tool systems for processing hydraulic cylinder parts]. Kursk, 2020. 117 p.

21. Yatsun E. I., Anikeeva N. P., Karnaukhov I. S. Increase in Processing Efficiency of Long-Length Shafts. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019; 23(1): 43-53 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-43-53>.

22. Yatsun E.I., Zubkova O.S., Gordeykov A.V., Zubkov D.A. Uvelichenie dinamicheskoi zhestkosti rastochnykh opravok [Increasing the dynamic rigidity of boring mandrels]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2020, no. 3 (341), pp. 45-50.

Информация об авторах / Information about the Authors

Яцун Елена Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: el.yatsun@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7633-6489>

Elena I. Yatsun, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Machine-building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: el.yatsun@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7633-6489>

Зубкова Оксана Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование» (МТиО), Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zubkova-oksana@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5818-8785>

Oksana S. Zubkova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Machine-building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zubkova-oksana@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5818-8785>

Могилев Сергей Николаевич, студент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: varior88@mail.ru

Sergey N. Mogilev, Student Machine-building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: varior88@mail.ru

Информационно-измерительная система мониторинга балок в строительных конструкциях

А. П. Локтионов ¹ ✉

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

✉ e-mail: loara@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Построение метода и алгоритма редукции измерений параметров идентификации балки в информационно-измерительной системе мониторинга строительных конструкций с измерением прогибов и восстановлением актуальных значений начальных параметров балки и внешней нагрузки при решении обратной задачи Коши.

Методы. Решение задачи осуществляется в постановке поперечного изгиба балки по теории Эйлера – Бернулли с помощью метода регуляризации и редукции измерений решением обратной задачи Коши линейной лагранжевой аппроксимацией в процедуре численного дифференцирования функции прогиба балки. Формулируется методология выявления незначимых параметров идентификации балки путем сравнения прогиба балки, вызванного исследуемым параметром, с порогом чувствительности средств измерений. При этом моделируется модификация пространства состояний параметров идентификации с уменьшением его размерности.

Результаты. Работоспособность сформулированной экспериментально-расчетной методики подтверждена численным экспериментом с нагрузкой на балку в виде изгибающего момента, сосредоточенной и (или) постоянной распределенной нагрузки. Установлено, что при выявлении незначимых начальных параметров и действующих на балку нагрузок редукция измерений повышает точность восстановления параметров идентификации балки.

Заключение. Разработанная методология может быть использована для повышения точности методик обследования строительных объектов на стадии экспериментально-теоретических исследований.

Ключевые слова: мониторинг; информационно-измерительная система; балка; обратная задача Коши; начальные условия.

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

Для цитирования: Локтионов А. П. Информационно-измерительная система мониторинга балок в строительных конструкциях // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 29-51. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-29-51>.

Поступила в редакцию 18.10.2021

Подписана в печать 02.11.2021

Опубликована 20.12.2021

Information and Measurement System for Monitoring Beams in Building Structures

Askold P. Loktionov ¹ ✉

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

✉ e-mail: loapa@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The development of a method and algorithm for reducing measurements of beam identification parameters in an information and measurement system for monitoring building structures with measurement of deflections and recovery of actual values of beam initial parameters and external load when solving the inverse Cauchy problem.

Methods. The solution of the problem is carried out through formulating the transverse bending of the beam according to the Euler – Bernoulli theory using the method of regularization and reduction of measurements by solving the inverse Cauchy problem by means of linear Lagrangian approximation in the procedure of numerical differentiation of the beam deflection function. A methodology is formulated for identifying insignificant beam identification parameters by comparing the deflection of the beam caused by the parameter under study with the sensitivity threshold of measuring instruments. In this case, the modification of the state space of identification parameters with a decrease in its dimension is simulated.

Results. The working capability of the formulated experimental calculation method is confirmed by numerical experiment with a load on the beam in the form of a bending moment, concentrated and (or) constant distributed load. It has been established that when identifying insignificant initial parameters and loads acting on the beam, the reduction of measurements increases the accuracy of restoring the beam identification parameters.

Conclusion. The developed methodology can be used to improve the accuracy of inspection methods of construction facilities at the stage of experimental and theoretical research.

Keywords: monitoring; information and measurement system; beam; inverse Cauchy problem; initial conditions.

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

For citation: Loktionov A. P. Information and Measurement System for Monitoring Beams in Building Structures. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 29-51 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-29-51>.

Received 18.10.2021

Accepted 02.11.2021

Published 20.12.2021

Введение

При инструментальном обследовании строительных конструкций (в том

числе балок) для определения реальных эксплуатационных нагрузок и воздей-

ствий, воспринимаемых обследуемыми конструкциями, проводят обмерные работы, в частности замеряют прогибы и деформации, что закреплено в документах, регламентирующих проведение обследования и мониторинга технического состояния строительных конструкций^{1,2}. В современной научной литературе уделяется большое внимание разработке методик обследования строительных конструкций [1-7]. В работах [8-13] рассматриваются информационно-измерительные системы (ИИС) и алгоритмы оценки конструкций параметрами идентификации. В ряде публикаций [14-18] выполняются исследования коэффициентной граничной обратной задачи по восстановлению коэффициентов дифференциального уравнения упругой линии балки или (и) его правой части для определения начальных условий в обратной задаче Коши и внешней нагрузки на балку. Недостающие граничные условия идентифицируются по дополнительной экспериментальной информации на участке, исключаящем концы балки, что учитывает силовое воздействие и силораспределение, неравномерность деформаций на концах балки и кинематические смещения упругих опор. В работах [19-25] рассмотрены методы

решения обратных задач на основе методов численного дифференцирования, полиномиальной аппроксимации, линейной лагранжевой интерполяции, а также проведения регуляризации и редукции измерений. В публикациях [26-37] исследовано применение сеточного метода с использованием шага сетки аппроксимации в качестве параметра регуляризации, констант Лебега для выбора оптимального распределения узлов сетки, а также алгоритмов вычисления производных. В работе [37] исследовалось численное дифференцирование для восстановления начальных данных Коши с использованием чебышёвского альтернанса. Представлена методология редукции измерений с размещением точек узлов аппроксимации в точках альтернанса порядка на единицу больше степени полинома Чебышёва первого рода. В то же время вопросы оценки погрешности восстановления актуальных начальных данных Коши еще требуют разработки подходов к уменьшению числа точек аппроксимации. Целью настоящей работы является построение методологии и алгоритма моделирования редукции измерений пространства состояний параметров идентификации балки в информационно-измерительной системе мониторинга строительной конструкции с измерением прогибов и восстановлением актуальных значений начальных параметров балки и внешней нагрузки решением обратной задачи Коши.

¹ ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М.: Стандартинформ, 2014. 54 с.

² СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций здания и сооружений. М.: Стандартинформ, 2011. 47 с.

Материалы и методы

Модель измерений и обработки данных (общие подходы)

Особенности обратных задач рассматриваем на примере консольной балки длиной l постоянного сечения ($EI = \text{const}$) под воздействием нагрузки F . На рис. 1 указано, что нагрузка F может быть комбинированной или единичной: постоянной распределенной нагрузкой интенсивностью q ($F = q$), изгибающим моментом M ($F = M$), сосредоточенной нагрузкой P ($F = P$).

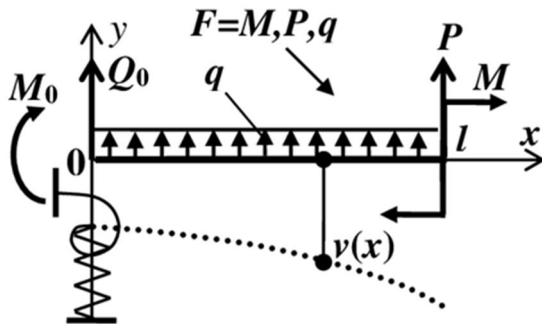


Рис. 1. Балка под нагрузкой

Fig. 1. Beam under load

В задаче Коши по теории Эйлера – Бернулли поперечного изгиба балки прогиб – частное решение линейного неоднородного дифференциального уравнения с одним неизвестным x

$$\frac{d^n v}{dx^n} = d_n \quad (1)$$

представим в виде полинома:

$$v(x) = \sum_{r=0}^n \frac{d_{F,r}}{r!} x^r, \quad (2)$$

где n – порядок дифференциального уравнения (1) и степень уравнения $v(x)$; $d_{F,n}$ – постоянная ($d_{F,n} \neq 0$), в частности,

$d_{F,4} = v^{(IV)}(0) = q/(EI)$; $d_{F,r} = v^{(r)}(0)$ – коэффициенты полинома ($r = 0 : n - 1$), связанные с начальными параметрами упругой линии балки ($d_{F,0} = v(0)$ – осадка опоры балки, $d_{F,1} = v'(0)$ – наклон упругой линии в опорном поперечном сечении балки, $d_{F,2} = v''(0) = M_0/(EI)$, $d_{F,3} = v'''(0) = Q_0/(EI)$; M_0 , Q_0 – опорные реакции.

Определим измерительный участок компактом $[a, b]$ на прямой Ox (см. рис. 1) при физических ограничениях на сетку узлов аппроксимации в виде:

$$\left. \begin{aligned} \alpha l = a, \quad b = (1 - \alpha)l, \\ a \leq x_1 < x_2 < \dots < x_N \leq b \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где N – количество дискретных значений $v^*(x_i)$ – измеряемых средствами измерений (СИ) значений функции $v(x_i)$; α – коэффициент, учитывающий силовое введение и силораспределение и исключающий измерения на концах балки из-за кинематического смещения упругой опоры, неравномерности деформаций (по результатам исследования [15] принимаем $\alpha = 0,05$); $i = 1 : N$.

Значения функций $y(x_i)$ и $y^*(x_i)$ – это входные величины в модели измерений; значения измеряемых начальных параметров балки d_0 , d_1 , M_0 , P_0 и постоянной d_n – выходные величины в модели измерений.

В табл. 1 показано, что элементы нагрузки F определяют структуру взаимосвязи начальных параметров упругой линии балки, в частности, при $n \leq 4$.

Классификацию представления множества начальных параметров и количество измеряемых прогибов N определяем двумя факторами: порядком n дифференциального уравнения (1) и характером связи начальных параметров $M_0 = (EI)d_{F,2}$, $P_0 = (EI)d_{F,3}$, а также $q = (EI)d_{F,4}$, с нагрузкой F .

Вводим в соответствие вариантам нагрузки F , указанным в табл. 1, и начальным параметрам, значения которых подлежат определению, матрицу функ-

ций пространства состояний параметров идентификации (табл. 2). Числом в начале обозначения функций указываем значение N , далее следуют подлежащие определению начальные параметры d_0 , d_1 и элементы нагрузки. В первом столбце табл. 2 «да» означает необходимость определения значения начального параметра, «нет» – значение начального параметра не определяется (предварительно определено).

Таблица 1. Характеристики нагружения балки

Table 1. Beam loading characteristics

F	n	N	$d_{F,2}$	$d_{F,3}$	$d_{F,4}$
M	2	1-3	$-M/(EI)$	-	-
P	3	1-3	$lP/(EI)$	$-P/(EI)$	-
q	4	1-3	$lq^2/(2EI)$	$-lq/(EI)$	$q/(EI)$
M, P	3	2-4	$(lP - M)/(EI)$	$-P/(EI)$	-
M, q	4	2-4	$(lq^2 - 2M)/(2EI)$	$-lq/(EI)$	$q/(EI)$
P, q	4	2-4	$(lq^2 + 2P)/(2EI)$	$-(P+lq)/(EI)$	$q/(EI)$
M, P, q	4	3-5	$(lq^2 + 2P - 2M)/(2EI)$	$-(P+lq)/(EI)$	$q/(EI)$

Таблица 2. Матрица функций пространства состояний параметров идентификации

Table 2. Matrix of functions of the state space of identification parameters

d_0 , d_1	Нагрузка F / Load F							
	Нет нагрузки	M	P	q	M, P	M, q	P, q	M, P, q
d_0 нет, d_1 нет	Нет нагрузки	$1M$	$1P$	$1q$	$2MP$	$2Mq$	$2Pq$	$3MPq$
d_0 да, d_1 нет	Нет нагрузки	$2d_0M$	$2d_0P$	$2d_0q$	$3d_0MP$	$3d_0Mq$	$3d_0Pq$	$4d_0MPq$
d_0 нет, d_1 да	Нет нагрузки	$2d_1M$	$2d_1P$	$2d_1q$	$3d_1MP$	$3d_1Mq$	$3d_1Pq$	$4d_1MPq$
d_0 да, d_1 да	Нет нагрузки	$3d_0d_1M$	$3d_0d_1P$	$3d_0d_1q$	$4d_0d_1MP$	$4d_0d_1Mq$	$4d_0d_1Pq$	$5d_0d_1MPq$

Параметрами, характеризующими состояние балки, могут быть опорные смещения и иные пригодные для измерения величины, называемые далее параметрами идентификации. Для идентификации моделей измерений и обработки данных используем указанные в табл. 2 параметры, характеризующие нагружение и опирание балки: значения элементов нагрузки M , P , q и значения начальных параметров d_0 , d_1 .

Модели измерений реализуем в ИИС, включающую СИ и информационную вычислительную систему (ИВС). СИ состоит из датчиков и канала связи [11] или только средств дистанционной регистрации [12].

Решаем обратную задачу Коши для уравнения (1) в общем случае при ненулевых начальных условиях на основе численного дифференцирования. Используем подход метода неопределенных коэффициентов, предусматриваем исключение влияния опорных реакций на начальные условия по вертикальному и вращательному смещению упругой опоры.

Множество измеренных в эксперименте значений $\{v^*(x_i)\}$ образует пространство наблюдений – конечномерное координатное евклидово пространство отсчетов на сетке (3). Рассматриваем численное дифференцирование с лагранжевой одномерной аппроксимацией первой степени. По предварительно вычисленным значениям лагранжевых коэффициентов в ИВС вычисляются приближенные значения начальных данных Коши, r -производных $d_{F,r}$:

$$\left. \begin{aligned} d_{F,r} &\approx \sum_{i=1}^N L_{F,r,i} v^*(x_i), \\ r &\in (1, 2, K, n), r \in R \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где $L_{F,r,i}$ – лагранжевы коэффициенты; R – множество действительных чисел.

Параметром регуляризации условной задачи оптимизации обратной задачи Коши используем распределение узлов сетки (3). Для выбора оптимального распределения узлов сетки используем целевую функцию – константу Лебега второго рода

$$\Lambda_{F,r} = \min \sum_{r=0}^N |L_{F,r,i}|. \quad (5)$$

В сравнительных исследованиях эффективности измерительных методов константу Лебега второго рода используем как минимальное абсолютное значение обусловленности задачи. Мерой влияния приведенной погрешности СИ на абсолютную погрешность определения начальных параметров балки используем безразмерное абсолютное значение числа обусловленности задачи

$$A_{F,r} = l^r \Lambda_{F,r}. \quad (6)$$

К параметрам идентификации модели измерений балки, указанным в табл. 2, добавляем распределение узлов сетки аппроксимации (3), константы Лебега второго рода и безразмерные абсолютные значения числа обусловленности задачи.

В дополнение к вышеизложенным общим подходам к модели измерений и обработки данных частные подходы

уточним на моделях $3d_0d_1q$, $4d_0d_1Mq$, и $4d_0d_1Pq$.

Алгоритмы обработки данных СИ

Решаем в ИВС задачу корректной рациональной модификации алгоритмов обработки данных СИ для снижения и последующего оценивания погрешности результатов. Предусматриваем редукцию исходной конечно-элементной модели. Переход от полномасштабной модели к редуцированной существенно уменьшает число значимых начальных параметров (имеющих ненулевые значения) и как следствие этого существенно уменьшает погрешность результатов.

Эту особенность учитываем при создании алгоритмов мониторинга, в подходе к определению качества алгоритмов. При выделении этапов алгоритмов и для оценки качества алгоритмов используем схему:

1) выделяем типовые модели параметров идентификации и исходных данных на входе алгоритма mk , $k=3:5$ ($m_3 = 3d_0d_1M$, $m_4 = 4d_0d_1MP$, $m_5 = 5d_0d_1MPq$) и соответствующие им алгоритмы;

2) проводим замеры прогибов балки в узлах аппроксимации;

3) вычисляем по измеренным прогибам значения начальных параметров и действующих на балку нагрузок, при выявлении среди них незначимых редуцируем пространство состояний параметров идентификации и переходим ко второму этапу;

4) для количественной оценки повышения точности определения начальных параметров оптимизацией числа узлов аппроксимации вводим показатель качества алгоритма

$$\pi_{F,r} = A_{F,r,N_{\max}} / A_{F,r,N_{\text{опт}}} ; \quad (7)$$

5) вычисляем (оцениваем) диапазон показателя качества алгоритма на типовых моделях.

Числовые значения показателя качества алгоритма представляем в виде графика.

Результаты и их обсуждение

Модель обработки данных $3d_0d_1q$

По условиям варианта $F = q$ в табл. 1 представляем уравнение (2) порядка $n = 4$ в виде

$$\left. \begin{aligned} v_q(x_i) &= d_{q,0} + d_{q,1}x_i + \\ &+ d_{q,4} \frac{l^2 x_i^2}{4} \gamma_{q,i}, \\ \gamma_{q,i} &= \left(1 - \frac{2x_i}{3l} + \frac{x_i^2}{6l^2} \right), \\ i &= 1:3 \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Для аппроксимационного многочлена

$$d_{q,4} \approx \sum_{i=1}^3 L_{q,4,i} v^*(x_i) \quad (9)$$

вида (4) согласно процедуре метода неопределенных коэффициентов при использовании уравнения (8) вводим условия

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^3 L_{q,4,i} &= 0, \quad \sum_{i=1}^3 L_{q,4,i} x_i = 0, \\ \frac{l^2}{4} \sum_{i=1}^3 L_{q,4,i} x_i^2 \gamma_i &= 1 \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Здесь и далее в схожих наборах условий первое и второе условия нулевые для исключения влияния упругости опоры на результаты определения коэффициентов d_r полинома (2) и начальных параметров при $r \in (2, 3)$.

Лагранжевы коэффициенты в многочлене (9) по условиям (10) для уравнения (8) можно вычислять с помощью формул

$$\left. \begin{aligned} L_{q,4,1} &= \frac{4}{l^2 K_q} (x_3 - x_2), \\ L_{q,4,2} &= -\frac{4}{l^2 K_q} (x_3 - x_1), \\ L_{q,4,3} &= \frac{4}{l^2 K_q} (x_2 - x_1) \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

$$\text{где } K_q = \begin{bmatrix} \gamma_{q1} (x_3 - x_2) x_1^2 - \\ -\gamma_{q2} (x_3 - x_1) x_2^2 + \\ +\gamma_{q3} (x_2 - x_1) x_3^2 \end{bmatrix}.$$

Регуляризируем данную задачу численным методом. Результат регуляризации на сетке аппроксимации (3) – распределение узлов сетки с точностью четырех знаков после запятой для числовых коэффициентов:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= 0,0500l, \\ x_2 &= 0,3907l, \\ x_3 &= 0,9500l \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

константа Лебега второго рода по формуле (5) $\Lambda_{q,4} = 130/l^4$ и значение числа обусловленности задачи по формуле (6) $A_{q,4} = 130$.

Здесь и далее вычисляем значения координат узлов сетки (3) с точностью четырех значащих цифр, а констант Ле-

бега второго рода и безразмерных абсолютных чисел обусловленности с точностью трех значащих цифр.

В варианте $F = q$ в табл.1 коэффициент $d_{q,3}$ отличается от коэффициента $d_{q,4}$ множителем $(-l)$, а коэффициент $d_{q,2}$ множителем $(lq/2)$, следовательно:

$$\left. \begin{aligned} L_{q,3,i} &= -lL_{q,4,i}, \\ \Lambda_{q,3} &= 130/l^3, \\ A_{q,3} &= 130 \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} L_{q,2,i} &= lqL_{q,4,i}/2, \\ \Lambda_{q,2} &= 65,2/l^2, \\ A_{q,2} &= 65,2 \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

Модель обработки данных $4d_0d_1Mq$

По условиям варианта $F = M$, q в табл.1 используем уравнение (2) порядка $n = 4$ в виде

$$\left. \begin{aligned} v_{M,q}(x_i) &= d_{M,q,0} + d_{M,q,1}x_i + \\ &+ d_{M,q,2} \frac{x_i^2}{2} - \\ &- d_{M,q,4} \frac{l^2 x_i^3}{24} (4l - x_i), \\ i &= 1:4 \end{aligned} \right\}. \quad (15)$$

Для аппроксимационного многочлена

$$d_{M,q,4} \approx \sum_{i=1}^4 L_{M,q,4,i} v^*(x_i) \quad (16)$$

вида (4) необходимо выполнить условия

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^4 L_{M,q,4,i} &= 0, \\ \sum_{i=1}^4 L_{M,q,4,i} x_i &= 0, \\ \sum_{i=1}^4 L_{M,q,4,i} x_i^2 &= 0, \\ \sum_{i=1}^4 L_{M,q,4,i} x_i^3 (4l - x_i) &= -24 \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

которым удовлетворяют лагранжевы коэффициенты

$$\left. \begin{aligned} L_{M,q,4,4} &= 24 \frac{K_{23}}{K_{234}}, \\ L_{M,q,4,3} &= -\frac{K_{24}}{K_{23}} L_{M,q,4,4}, \\ L_{M,q,4,2} &= -(x_3 - x_1) L_{M,q,4,3} - \\ &\quad -(x_4 - x_1) L_{M,q,4,4}, \\ L_{M,q,4,1} &= -\sum_{i=2}^4 L_{M,q,4,i} \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

где $K_{1,i} = (4l - x_i)x_i^3 - (4l - x_1)x_1^3$,

$i \in (2, 3, 4)$;

$K_{i,2} = (x_i - x_1)/(x_2 - x_1)$,

$i \in (3, 4)$;

$K_{2,i} = (x_i - x_1)(x_i - x_2)$,

$i \in (3, 4)$;

$K_{2,3,4} = K_{2,3}(K_{1,4} - K_{4,2}K_{1,2}) -$

$-K_{2,4}(K_{1,3} - K_{3,2}K_{1,2})$.

Регуляризируем данную задачу численным методом. Результат регуляризации на сетке аппроксимации (3) – распределение узлов сетки

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= 0,0500l, \\ x_2 &= 0,2527l, \\ x_3 &= 0,6973l, \\ x_4 &= 0,9500l \end{aligned} \right\}, \quad (19)$$

константа Лебега второго рода $\Lambda_{M,q,4} = 520/l^4$ и значение числа обусловленности задачи $A_{M,q,4} = 520$.

В варианте $F = M$, q в табл.1 коэффициент $d_{M,q,3}$ отличается от коэффициента $d_{M,q,4}$ множителем $(-l)$, следовательно, на этот множитель отличаются

лагранжевы коэффициенты и константа Лебега второго рода для $d_{M,q,3}$:

$$\left. \begin{aligned} L_{M,q,3,i} &= -l L_{M,q,4,i}, \\ \Lambda_{M,q,3} &= 520/l^3, \\ A_{M,q,3} &= 520 \end{aligned} \right\}, \quad (20)$$

распределение узлов сетки аппроксимации совпадает с распределением (19).

Используем уравнение (15) для аппроксимационного многочлена

$$d_{M,q,2} \approx \sum_{i=1}^4 L_{M,q,2,i} v^*(x_i). \quad (21)$$

Здесь необходимо выполнить условия

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^4 L_{M,q,2,i} &= 0, \\ \sum_{i=1}^4 L_{M,q,2,i} x_i &= 0, \\ \sum_{i=1}^4 L_{M,q,4,i} x_i^2 &= 2, \\ \sum_{i=1}^4 L_{M,q,4,i} x_i^3 (4l - x_i) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (22)$$

которым удовлетворяют лагранжевы коэффициенты

$$\left. \begin{aligned} L_{M,q,2,4} &= 2 \frac{K_{13} - K_{12}K_{32}}{K_{234}}, \\ L_{M,q,2,3} &= \frac{2 - L_{M,q,2,4}}{K_{23}}, \\ L_{M,q,2,2} &= -\sum_{i=3}^4 K_{i2} L_{M,q,2,i}, \\ L_{M,q,2,1} &= -\sum_{i=2}^4 L_{M,q,2,i} \end{aligned} \right\}. \quad (23)$$

Регуляризируем данную задачу численным методом. Результат регуляризации на сетке аппроксимации (3) – распределение узлов сетки (19), константа Лебега второго рода $\Lambda_{M,q,2} = 184/l^2$ и значение числа обусловленности задачи $A_{M,q,2} = 184$.

Модель обработки данных $4d_0d_1Pq$ для балки с комбинированной нагрузкой P и q

По условиям варианта $F = P, q$ в табл.1 используем уравнение (2) порядка $n = 4$ в виде

$$\left. \begin{aligned} v_{P,q}(x_i) &= d_{P,q,0} + d_{P,q,1}x_i - \\ &- d_{P,q,3} \frac{x_i^2}{6} (3l - x_i) - \\ &- d_{P,q,4} \frac{x_i^2}{24} (6l^2 - x_i^2), \\ i &= 1:4 \end{aligned} \right\}. \quad (24)$$

Для аппроксимационного многочлена

$$d_{P,q,4} \approx \sum_{i=1}^4 L_{P,q,4,i} v^*(x_i) \quad (25)$$

вида (4) необходимо выполнить условия

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^4 L_{P,q,4,i} &= 0, \\ \sum_{i=1}^4 L_{P,q,4,i} x_i &= 0, \\ \sum_{i=1}^4 L_{P,q,4,i} x_i^2 (3l - x_i) &= 0, \\ \sum_{i=1}^4 L_{P,q,4,i} x_i^2 (6l^2 - x_i^2) &= -24 \end{aligned} \right\}, \quad (26)$$

которым удовлетворяют лагранжевы коэффициенты

$$\left. \begin{aligned} L_{P,q,4,4} &= \frac{24}{K_{4,3} - K_{6,3}K_{6,4}}, \\ L_{P,q,4,3} &= -K_{4,3}L_{P,q,4,4}, \\ L_{P,q,4,2} &= -K_{3,2}L_{P,q,4,3} - \\ &- K_{4,2}L_{P,q,4,4}, \\ L_{P,q,4,1} &= -\sum_{i=2}^4 L_{P,q,4,i} \end{aligned} \right\}, \quad (27)$$

где $K_{P,q,1,i} = (3l - x_i)x_i^2 - (3l - x_1)x_1^2$,
 $i \in (2, 3, 4)$;

$$K_{i,2,2} = K_{P,q,1,i} - K_{i,2}K_{P,q,1,2},$$

$i \in (3, 4)$;

$$K_{4,3} = K_{4,2,2}/K_{3,2,2}, i \in (3, 4);$$

$$K_{5,i} = (6l^2 - x_i^2)x_i^2 - (6l^2 - x_1^2)x_1^2,$$

$i \in (3, 4)$;

$$K_{6,i} = K_{5,i} - K_{i,2}K_{5,2}, i \in (3, 4).$$

Регуляризируем данную задачу численным методом. Результат регуляризации на сетке аппроксимации (3) – распределение узлов сетки

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= 0,0500l, \\ x_2 &= 0,2313l, \\ x_3 &= 0,6560l, \\ x_4 &= 0,9500l \end{aligned} \right\}, \quad (28)$$

константа Лебега второго рода $\Lambda_{P,q,4} = 1184/l^4$ и значение числа обусловленности задачи $\Lambda_{P,q,4} = 1184$.

Для аппроксимационного многочлена

$$d_{P,q,3} \approx \sum_{i=1}^4 L_{P,q,3,i} v^*(x_i) \quad (29)$$

с учетом уравнения (24) вводим условия

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^4 L_{P,q,3,i} &= 0, \\ \sum_{i=1}^4 L_{P,q,3,i} x_i &= 0, \\ \sum_{i=1}^4 L_{P,q,3,i} x_i^2 (3l - x_i) &= -6, \\ \sum_{i=1}^4 L_{P,q,3,i} x_i^2 (6l^2 - x_i^2) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (30)$$

которым удовлетворяют лагранжевы коэффициенты

$$\left. \begin{aligned} L_{P,q,3,4} &= -\frac{6}{K_{4,2,2} - K_{3,2,3}K_{3,2,2}}, \\ L_{P,q,3,3} &= -K_{3,2,3}L_{P,q,3,4}, \\ L_{P,q,3,2} &= -\sum_{i=3}^4 L_{P,q,3,i}K_{i,2}, \\ L_{P,q,3,1} &= -\sum_{i=2}^4 L_{P,q,3,i} \end{aligned} \right\}, \quad (31)$$

$$\text{где } K_{3,2,3} = \frac{K_{5,4} - K_{4,2}K_{5,2}}{K_{5,3} - K_{3,2}K_{5,2}}.$$

Регуляризируем данную задачу численным методом. Результат регуляризации – распределение узлов сетки (28), константа Лебега второго рода $\Lambda_{P,q,3} = 838/l^3$, число обусловленности задачи $A_{P,q,3} = 838$.

Для определения коэффициента $d_{P,q,2}$ используем уравнение (2) в виде

$$\left. \begin{aligned} v_{P,q}(x_i) &= d_{P,q,0} + d_{P,q,1}x_i + \\ &+ d_{P,q,2} \frac{x_i^2}{6}(3l - x_i) - \\ &- d_{P,q,4} \frac{x_i^3}{24}(2l - x_i), \\ i &= 1:4 \end{aligned} \right\}. \quad (32)$$

Для аппроксимационного многочлена

$$d_{P,q,2} \approx \sum_{i=1}^4 L_{P,q,2,i} v^*(x_i) \quad (33)$$

вида (4) необходимо выполнить условия

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^4 L_{P,q,2,i} &= 0, \\ \sum_{i=1}^4 L_{P,q,2,i} x_i &= 0, \\ \sum_{i=1}^4 L_{P,q,2,i} x_i^2 (3l - x_i) &= 6l, \\ \sum_{i=1}^4 L_{P,q,2,i} x_i^3 (2l - x_i) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (34)$$

которым удовлетворяют лагранжевы коэффициенты

$$\left. \begin{aligned} L_{P,q,2,4} &= \frac{6l}{K_{4,2,2} - K_{3,2,2}K_{8,4}/(K_{8,3})}, \\ L_{P,q,2,3} &= -K_{8,4}L_{P,q,2,4}/K_{8,3}, \\ L_{P,q,2,2} &= -\sum_{i=3}^4 L_{P,q,2,i}K_{i,2}, \\ L_{P,q,2,1} &= -\sum_{i=2}^4 L_{P,q,2,i} \end{aligned} \right\}, \quad (35)$$

$$\text{где } K_{7,i} = (2l - x_i)x_i^3 - (2l - x_1)x_1^3, \\ i \in (2, 3, 4);$$

$$K_{8,i} = K_{7,i} - K_{i,2}K_{7,2}, i \in (3, 4).$$

Регуляризируем данную задачу численным методом. Результат регуляризации на сетке аппроксимации (3) – распределение узлов сетки (28), константа Лебега второго рода $\Lambda_{P,q,2} = 252/l^2$ и число обусловленности задачи $A_{P,q,2} = 252$.

Оценивание повышения точности определения начальных параметров оптимизацией числа узлов аппроксимации

В рассмотренных частных примерах модели измерений и обработки данных получены формулы (12), (19), (24) с оптимальным количеством узлов сетки аппроксимации $N_{\text{опт}} < N_{\text{max}} = n + 1$, не выполняется исследованное в работе [37] совпадение чебышёвского альтернанса порядка $n + 1$ с набором N точек узлов аппроксимации. Здесь введены ограничения в виде алгебраических функций, связывающих начальные данные между собой (табл. 1), что позволило уменьшить количество узлов аппроксимации и безразмерное абсолютное число обусловленности задачи. На рис. 2 показаны пять выборок получен-

ной генеральной совокупности множества элементов $A_{F,2}$ в моделях измерений и обработки данных с распределенной нагрузкой q ($n = 4$) в составе нагрузки F . Максимальное число $A_{F,2}$ получено при $N = N_{\max} = n + 1 = 5$. Остальные числа $A_{F,2}$ меньше в соответствии с меньшими значениями числа N .

В представленных на рис. 2 упорядоченных в порядке возрастания выборках элементов $A_{F,2}$, каждая из выборок имеет общий признак – одинаковое значение числа точек аппроксимации

$N = 1:5$. Разнообразие элементов $A_{F,2}$ характеризуем экстремальными крайними значениями $A_{F,2\min} = 4,29$ и $A_{F,2\max} = 506$, размахом $A_{F,2\max} - A_{F,2\min} = 502$ и псевдолинейной (внутренне линейной) моделью, преобразованной в линейную модель вида:

$$T = 0,114 + 0,518N, \quad (36)$$

где $T = \log A_{F,2}$.

Характеристика (36) является неточной, она пригодна для быстрой, ориентировочной оценки чисел $A_{F,2}$.

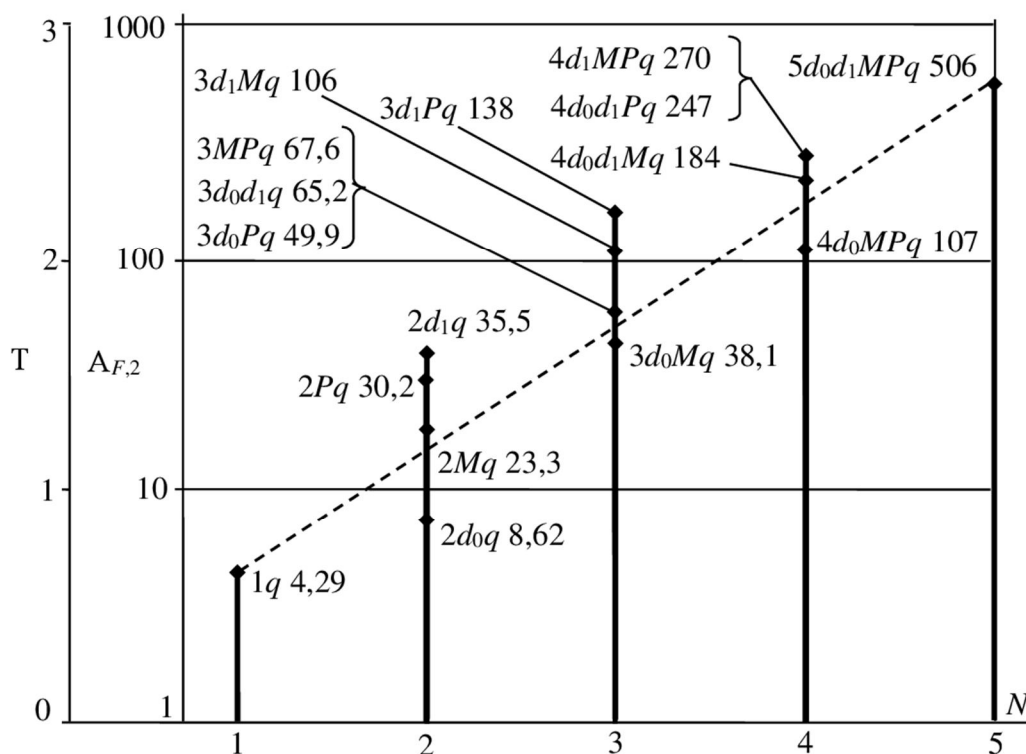


Рис. 2. Варианты выборок элементов $A_{F,2}$ в моделях измерений с распределенной нагрузкой q в составе нагрузки F

Fig. 2. Variants of samples of elements $A_{F,2}$ in measurement models with distributed load q as part of load F

На рис. 3 показано, что уменьшение абсолютного числа обусловленности задачи $A_{F,r}$ связано с уменьшением числа узлов аппроксимации. Точками на рис. 3

указаны координаты x_i узлов аппроксимации. Точки с одинаковым значением i в разных моделях измерений соединены нумерованными пунктирными линиями.

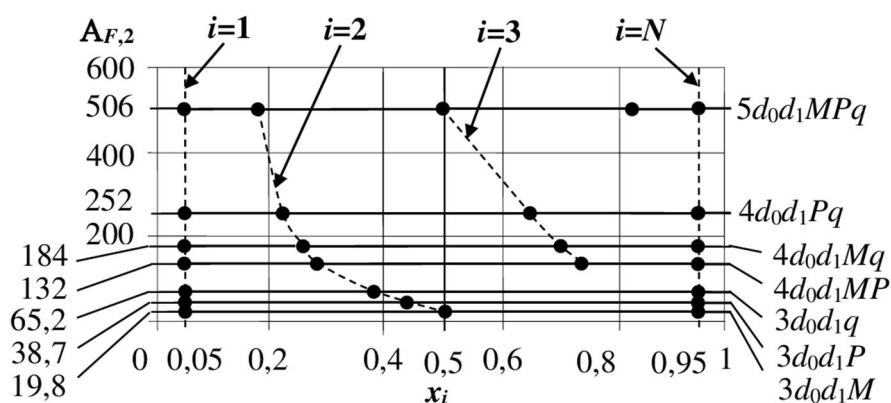


Рис. 3. Безразмерное абсолютное число обусловленности задачи $A_{4,2}$

Fig. 3. Non-dimensional absolute value of the conditionality of the problem $A_{4,2}$

На рис. 4 показано, что повышение точности моделей измерений оптимизацией числа узлов аппроксимации достигнуто рациональной модификацией алгоритмов обработки данных СИ. При выявлении среди параметров идентификации балки (начальных параметров

и действующих на балку нагрузок) незначимых, вызывающих прогибы балки менее v_0 – порога чувствительности СИ, выполняется модификация пространства состояний параметров идентификации с уменьшением его размерности.

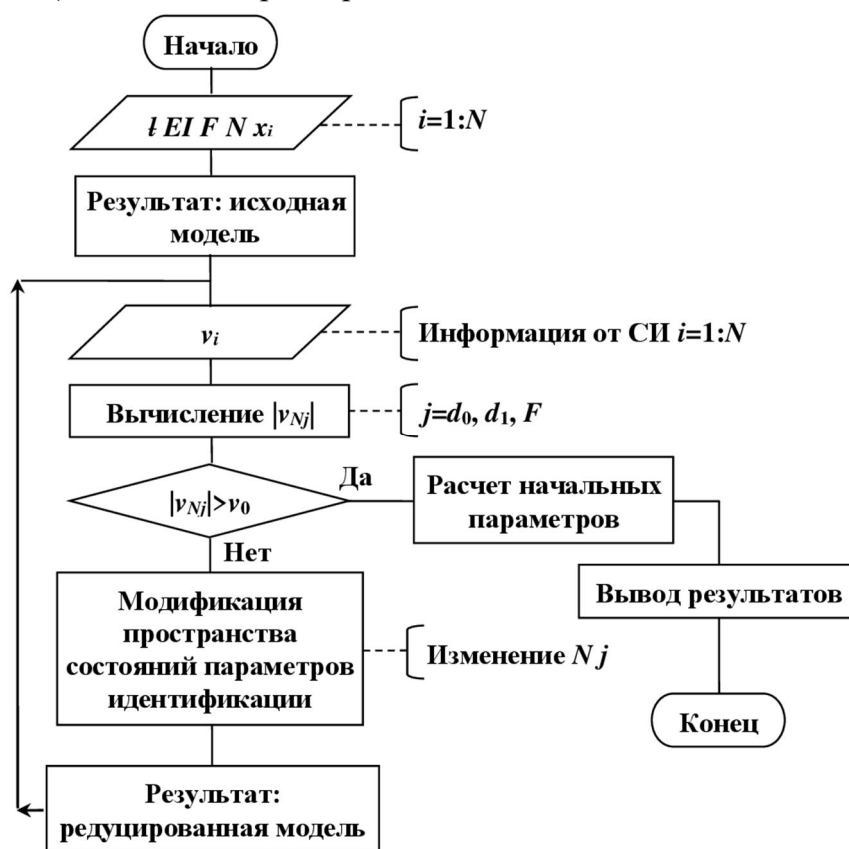


Рис. 4. Алгоритм обработки данных средства измерений

Fig. 4. Algorithm for data processing of measuring instrument

В примере исходной модели $4d_0d_1MP$ – одной из типовых моделей формируем матрицу функций пространства состояний параметров идентификации вида матрицы в табл. 2. Разнообразие функций в матрице состоит из элементов $1M$, $2d_0M$, $2d_1M$, $3d_0d_1M$, $2d_0P$, ..., $4d_0d_1MP$. На рис. 5 указано, что матрицу используем при редукции пространства состояний параметров идентификации. На выходе алгоритма получаем актуальные значения начальных параметров балки и внешней нагрузки, позволяющие определить реальную расчетную схему балки, характеристику опоры. В частности, если d_0 – значимый параметр, d_1 незначимый, то опора шарнирная, а если d_0 и d_1 незначимые параметры, то левый конец балки (см. рис. 1) защемлен.

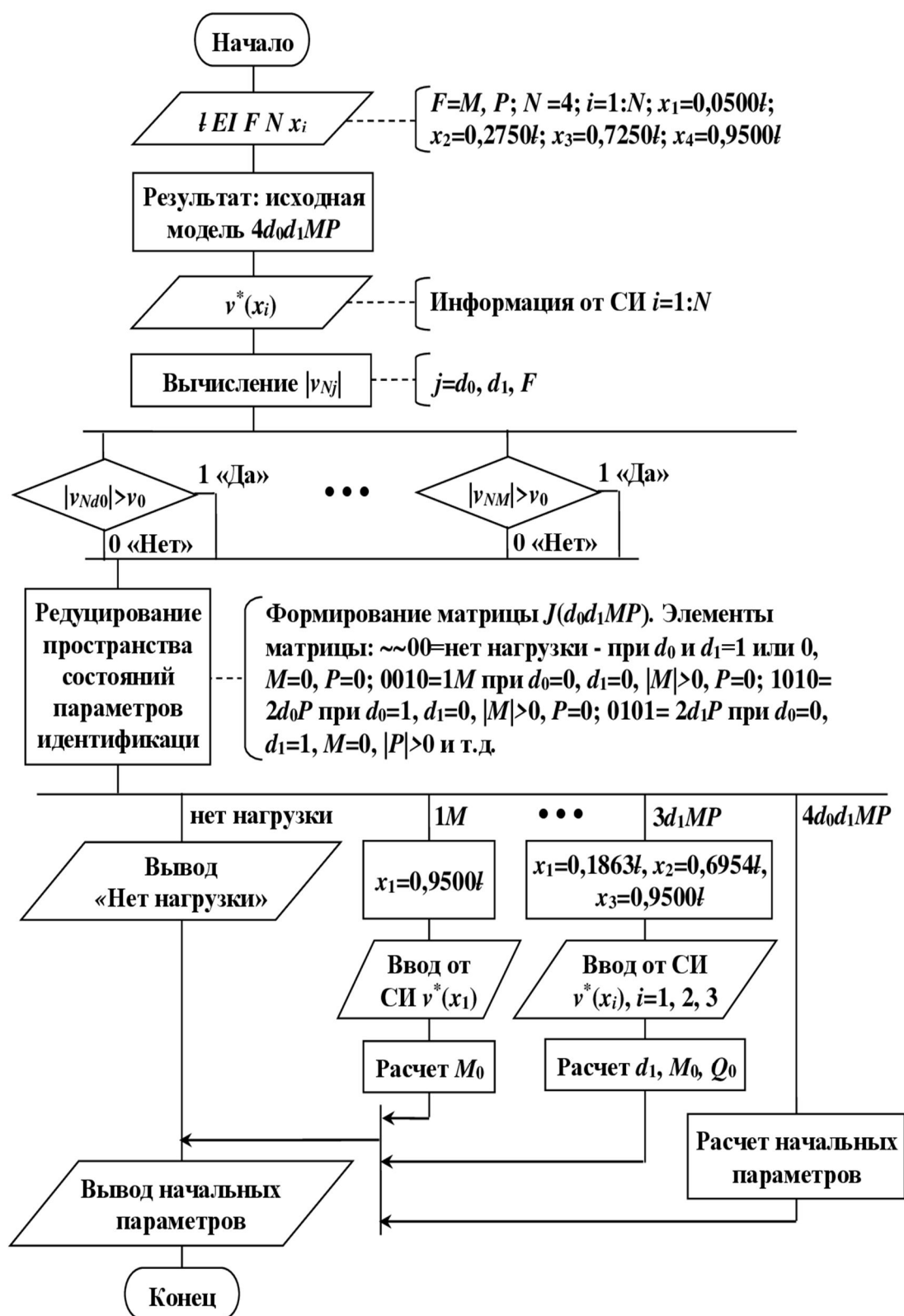
Оценку повышения точности определения начальных параметров показателем качества алгоритма выполнена на примерах моделей, полученных редукцией типовых моделей $4d_0d_1MP$ и $5d_0d_1MPq$ для $r = 2$. На рис. 6 указано, что у моделей измерений при нагрузках M или P значения показателя качества алгоритма $\pi_{F,2}$, рассчитанное по формуле (7), составляют 3,4 и 6,7 при значении приведенного на рис. 3 числа обусловленности задачи $A_{F,2,N_{\max}} = 132$ для модели $4d_0d_1MP$. У моделей измерений при комбинациях нагрузок M , P с q диапазон значений показателя качества алгоритма $\pi_{F,2}$ составляет 2,0 ... 7,8 с учетом числа обусловленности задачи $A_{F,2,N_{\max}} = 506$ для модели $5d_0d_1MPq$.

Координаты узлов аппроксимации в моделях $3d_0d_1M$, $3d_0d_1P$, $4d_0d_1MP$ на рис. 3, а также в модели $1M$ на рис. 5, получены в работе [11]. Координаты узлов аппроксимации в модели $5d_0d_1MPq$ на рис. 3 получены в работе [37]. Координаты узлов аппроксимации в моделях $3d_0d_1q$, $4d_0d_1Mq$, $4d_0d_1Pq$ на рис. 3 и в формулах (12), (19), (24), а также в модели $3d_1MP$ на рис. 5, получены впервые. Впервые получены формулы (11), (18), (23), (27), (31), (35) для вычисления лагранжевых коэффициентов, значений констант Лебега второго рода и безразмерных абсолютных значений числа обусловленности задачи в моделях $3d_0d_1q$, $4d_0d_1Mq$ и $4d_0d_1Pq$.

Рассмотренная процедура, позволяет на основе измеренных прогибов оценивать актуальный набор начальных параметров балки и внешнюю нагрузку при мониторинге балки.

Выводы

Предложенный экспериментально-расчетный метод мониторинга балки позволяет рассчитать параметры идентификации, характеризующие состояние балки, с учетом повышения точности редукцией измерений при выявлении незначимых начальных параметров и действующих на балку нагрузок. Методология исследований включает математическое моделирование обратной задачи Коши в информационно-измерительной системе с помощью метода редукции измерений и регуляризации.

Рис. 5. Алгоритм обработки данных в модели $4d_0d_1MP$ Fig. 5. Algorithm for data processing in the $4d_0d_1MP$ model

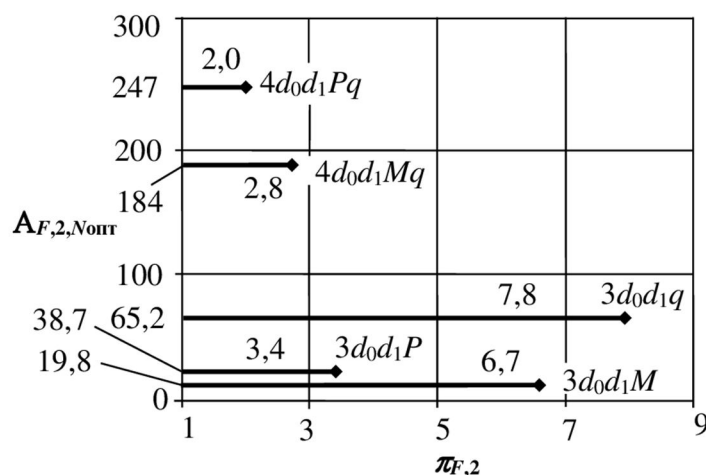


Рис. 6. Повышение точности моделей измерений оптимизацией числа узлов аппроксимации

Fig. 6. Improving the accuracy of measurement models by optimizing the number of approximation nodes

На основе метода линейной лагранжевой аппроксимации для поперечного изгиба балки построена процедура численного дифференцирования уравнения прогиба с рассмотрением функциональной взаимосвязи начальных параметров упругой линии балки. При этом принимается во внимание неравномерность

деформаций на концах балки. Работоспособность сформулированного алгоритма подтверждена численным экспериментом для вариантов единичной или комбинированной на-грузки балки в виде изгибающего момента, сосредоточенной нагрузки и постоянной распределенной нагрузки.

Список литературы

1. Chen H-P., Ni Yi-Q. Structural health monitoring of large civil engineering structures. 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA: John Wiley & Sons Inc.; 2018. 302 p. <https://doi.org/10.1002/9781119166641>.
2. Kashevarova G. G., Tonkov, Y. L., Tonkov I.L. Intellectual automation of engineering survey of building objects // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. №13(3). P. 42-57. <https://doi.org/10.22337/1524-5845-2017-13-3-42-57>.
3. Shi Z., O'Brien W. Development and implementation of automated fault detection and diagnostics for building systems: A review // *Automation in Construction*. 2019. №104. P. 215-229. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.04.002>.
4. Lehmhus D., Busse M., Structural health monitoring (SHM). In: Bosse S., Lehmhus D., Lang W. (eds). *Material Integrated Intelligent Systems Technology and Applications: Technology and Applications*. John Wiley & Sons Inc.; 2018, pp. 529–570. 696 p. <https://doi.org/10.1002/9783527679249>.

5. Meshchikhin I. A., Gavryushin S. S. The envelope method in the problem of choosing a rational composition of measuring instruments // *Measurement Techniques*. 2021. №64. pp. 151-155. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01910-8>.
6. Перельмутер А.В. Обратные задачи строительной механики // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2020. №22(4). С. 83-101. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-4-83-101>.
7. Building structural health monitoring using dense and sparse topology wireless sensor network / M.E. Haque, M.F.M. Zain, M.A. Hannan, M.H. Rahman // *Smart Structures and Systems*. 2015. №16(4). P. 607-621. <https://doi.org/10.12989/sss.2015.16.4.623>.
8. Siraya T. N. Methods of data processing in measurements and metrological models // *Measurement Techniques*. 2018. №61. P. 9-16. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1380-y>.
9. Bakushinsky A.B., Kokurin M.M., Kokurin M.Yu. Regularization algorithms for Ill-posed problems. Boston. USA: De Gruyter; 2018. <https://doi.org/10.1515/9783110557350>.
10. Meshchikhin I. A., Gavryushin S. S. Quality criteria and algorithm for selecting reduced finite element models for technical design monitoring // *Mat. Mod. Chisl. Met.* 2016. №12. P. 103-121. <https://doi.org/10.18698/2309-3684-2016-4-103121>.
11. Локтионов А.П. Структурная регуляризация подсистемы преобразовательного компонента преобразовательно-вычислительных систем. Курск : Курск. гос. техн. ун-т, 2009. 323 с. <https://elibrary.ru/item.asp?id=19594039>.
12. Huang Y., Ludwig S.A., Deng F. Sensor optimization using a genetic algorithm for structural health monitoring in harsh environments // *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2016. №6(3). P. 509-519. <https://doi.org/10.1007/s13349-016-0170-y>.
13. A wireless passive sensing system for displacement/strain measurement in reinforced concrete members / B. Ozbey, V.B. Erturk, H.V. Demir, A. Altintas, O.A. Kurc // *Sensors*. 2016. №16(4). P. 1-14. <https://doi.org/10.3390/s16040496>.
14. Локтионов А. П. Информационная система анализа балочных элементов под комбинированной нагрузкой // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2021. №2. С. 45-52. <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2021.2.45.52>.
15. Лалин В.В., Беяев М.О. Изгиб геометрически нелинейного консольного стержня. Решение по теориям Кирхгофа и Коссера – Тимошенко // *Инженерно-строительный журнал*. 2015. №53(1). С. 39-55. <https://doi.org/10.5862/MCE.53.5>. URL: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/1\(53\)/05.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/1(53)/05.pdf).
16. Wang T., He T., Li H. Effects of deformation of elastic constraints on free vibration characteristics of cantilever Bernoulli-Euler beams // *Structural Engineering and Mechanics*. 2016. №59(6). P. 1139-1153. <https://doi.org/10.12989/sem.2016.59.6.000>.

17. Tushina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections // *Magazine of Civil Engineering*. 2017. №73(5). P. 25-39. <https://doi.org/10.18720/MCE.73.3>. URL: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/5\(73\)/03.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/5(73)/03.pdf).
18. Tushina O.A., Danilov A.I. The stiffness of rigid joints of beam with hollow section column // *Magazine of Civil Engineering*. 2016. №64(4). P. 40-51. <https://doi.org/10.5862/MCE.64.4>. URL: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/4\(64\)/04.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/4(64)/04.pdf).
19. Кудрявцев К.Я. Алгоритм построения полинома наилучшего равномерного приближения по экспериментальным данным // *Вестник национального исследовательского ядерного университета МИФИ*. 2019. №8(5). С. 480-486. <https://doi.org/10.1134/S2304487X1905002X>.
20. Kalenchuk-Porkhanova A. Best Chebyshev approximation for compression of big information arrays // *Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference named after A. I. Kitov "Information Technologies and Mathematical Methods in Economics and Management (IT&MM-2020)"*. October 15-16, Moscow: Russia, 2020. P. 1-13. URL: <http://sunsite.informatik.rwth-aachen.de/ftp/pub/publications/CEUR-WS/Vol-2830.zip.paper25.pdf>. (дата обращения 20.04.2021).
21. Chekushkin V.V., Mikheev K.V. Fast search algorithms for the best approximation polynomials for reproduction of functional dependences in data-measurement systems // *Measurement Techniques*. 2016. №59(4). P. 351-356. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-0970-9>.
22. Loktionov A.P. Improving the polynomial approximation of an object characteristic that is not directly measurable by using measurement reduction // *Measurement Techniques*. 2017. №59(10). P. 1042-1050. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1089-3>.
23. Balakin D. A., Pyt'ev Yu. P. Measurement reduction in the presence of subjective information // *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2018. №30(12). P. 84-110. <http://www.mathnet.ru/links/8979c74fdee02631a8d8ed00b41bb7be/mm4028.pdf>.
24. Локтионов А.П. О численном дифференцировании при полиномиальном приближении / Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 1999. 28 с. Деп. в ВИНТИ 28.06.99, № 2080-B99. <https://elibrary.ru/item.asp?id=24302755>.
25. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Shershneva E.O., Breus I.V. Approximation methods for the actual trajectory of load carried by overhead crane to the required one – a comparative analysis // *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*. 2016. №10(2). P. 45-56. URL: http://www.sscm.kg.ac.rs/jsscm/downloads/Vol10No2/Vol10No2_05.pdf.
26. Yang C. Sensor placement for structural health monitoring using hybrid optimization algorithm based on sensor distribution index and FE grids // *Structural Control and Health Monitoring*. 2018. №5(6). P. 1-19. <https://doi.org/10.1002/stc.2160>.

27. Favorskaya A.V., Petrov I.B. Grid-characteristic calculation of multistorey buildings destruction // *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2020. №32(3). P. 102-114. <https://doi.org/10.20948/mm-2020-03-06>.

28. Loktionov A.P. Information system for analysis of beam elements under combined load // *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2021. №2. P. 45-52. <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2021.2.45.52>.

29. Петров В.В. Нелинейная инкрементальная строительная механика. М., Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 484 с. Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. URL: <https://www.iprbookshop.ru/98391.html> (дата обращения: 09.10.2021).

30. Danilov M. F., Savel'eva A. A. Analysis of basic data of unstable problems of coordinate measurements of geometrical parameters of products // *Measurement Techniques*. №61(6). P. 588-594. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1469-3>.

31. Калиткин Н.Н., Колганов С.А. Построение аппроксимаций, удовлетворяющих чебышевскому альтернансу. Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2020. № 91. 33 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2020-91> <https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2020-91>

32. Агафонова И.В., Малозёмов В.Н. Экстремальные полиномы, связанные с полиномами Золотарёва // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. 2020. №65(7). Вып. 1. С. 3-14. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2020.101>.

33. Малозёмов В.Н., Тамасян Г.Ш. Этюд на тему полиномиальной фильтровой задачи ($n = 3$) // Избранные лекции по экстремальным задачам. Часть вторая. СПб.: Изд-во ВВМ, 2017. С. 305–315. URL: <http://www.apmath.spbu.ru/cnsa/rep15.shtml#0312> (дата обращения: 26.05.2019).

34. Ibrahimoglu B.A. Lebesgue functions and Lebesgue constants in polynomial interpolation // *Journal of Inequalities and Applications*. 2016. №2016:93. P. 1-15. <https://doi.org/10.1186/s13660-016-1030-3>.

35. Алиев М.С. Об одной классификации линейно независимых систем функций // *Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки*. 2021. №36(1). С. 15-23. DOI: 10.21779/2542-0321-2021-36-1-15–23.

36. Loktionov A.P. A measuring system for determination of a cantilever beam support moment // *Smart Structures Systems*. 2017. №19(4). P. 431-439. DOI: 10.12989 / sss.2017.19.4.431.

37. Loktionov A.P. Numerical differentiation in the measurement model // *Measurement Techniques*. 2019. №62. P. 673-680. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01677-z>.

References

1. Chen H-P., Ni Yi-Q. Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures. 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA: John Wiley & Sons Inc.; 2018. 302 p. <https://doi.org/10.1002/9781119166641>.
2. Kashevarova G. G., Tonkov, Y. L., Tonkov I.L. Intellectual automation of engineering survey of building objects. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2017, no. 13(3), pp. 42-57. <https://doi.org/10.22337/1524-5845-2017-13-3-42-57> (In Russ.).
3. Shi Z., O'Brien W. Development and implementation of automated fault detection and diagnostics for building systems: A review. *Automation in Construction*, 2019, no. 104, pp. 215-229. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.04.002>.
4. Lehmhus D., Busse M., Structural Health Monitoring (SHM) in book: Material Integrated Intelligent Systems Technology and Applications: Technology and Applications, 2018, pp. 529–570. <https://doi.org/10.1002/9783527679249>.
5. Meshchikhin I. A., Gavryushin S. S. The envelope method in the problem of choosing a rational composition of measuring instruments. *Measurement Techniques*, 2021, no 64, pp. 151-155. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01910-8>.
6. Perelmuter A.V. [Inverse problems of structural mechanics]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta=Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. JOURNAL of Construction and Architecture*. 2020; no. 22(4): pp. 83-101. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-4-83-101> (In Russ.).
7. Haque M.E., Zain M.F.M., Hannan M.A., Rahman M.H. Building structural health monitoring using dense and sparse topology wireless sensor network. *Smart Structures and Systems*, 2015, no. 16(4), pp. 607-621. <https://doi.org/10.12989 / sss.2015.16.4.623>.
8. Siraya T. N. Methods of data processing in measurements and metrological models. *Measurement Techniques*, 2018, no 61, pp. 9-16. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1380-y>.
9. Bakushinsky A.B., Kokurin M.M., Kokurin M.Yu. Regularization Algorithms for Ill-Posed Problems. Boston. USA: De Gruyter; 2018. <https://doi.org/10.1515/9783110557350>.
10. Meschikhin I. A., Gavryushin S. S. Quality criteria and algorithm for selecting reduced finite element models for technical design monitoring, *Mat. Mod. Chisl. Met.*, 2016, no 12, pp. 103-121. <https://doi.org/10.18698/2309-3684-2016-4-103121> (in Russ.).
11. Loktionov A. P. [Structural regularization of the subsystem of the converting component of converting computing systems]. Kursk, 2009. 323 p. <https://elibrary.ru/item.asp?id=19594039> (In Russ.).
12. Huang Y., Ludwig S.A., Deng F. Sensor optimization using a genetic algorithm for structural health monitoring in harsh environments. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2016, no. 6(3), pp. 509-519. <https://doi.org/10.1007/s13349-016-0170-y>.

13. Ozbey B., Erturk V.B., Demir H.V., Altintas A., Kurc O.A. A wireless passive sensing system for displacement/strain measurement in reinforced concrete members. *Sensors*, 2016, no. 16(4), pp. 1-14. <https://doi.org/10.3390/s16040496>.
14. Loktionov A.P. [Information system for analysis of beam elements under combined load]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii=Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2021; no. 2, pp. 45–52. <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2021.2.45.52> (In Russ.).
15. Lalin V.V., Belyaev M.O. [Bending of geometrically nonlinear cantilever beam. Results obtained by Cosserat – Timoshenko and Kirchhoff's rod theories]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal=Magazine of Civil Engineering*. 2015; no. 53(1): pp. 39-55. DOI: 10.5862/MCE.53.5. Available at: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/1\(53\)/05.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/1(53)/05.pdf) (In Russ.).
16. Wang T., He T., Li H. Effects of deformation of elastic constraints on free vibration characteristics of cantilever Bernoulli-Euler beams. *Structural Engineering and Mechanics*, 2016, no. 59(6), pp. 1139-1153. <https://doi.org/10.12989/sem.2016.59.6.000>.
17. Tushina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections. *Magazine of Civil Engineering*, 2017, no. 73(5), pp. 25-39. <https://doi.org/10.18720/MCE.73.3>. Available at: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/5\(73\)/03.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/5(73)/03.pdf).
18. Tushina O.A., Danilov A.I. The stiffness of rigid joints of beam with hollow section column. *Magazine of Civil Engineering*, 2016, no. 64(4), pp. 40-51. <https://doi.org/10.5862/MCE.64.4>. Available at: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/4\(64\)/04.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/4(64)/04.pdf).
19. Kudryavcev K.Ya. [Algorithm for constructing a polynomial of the best uniform approximation from experimental data]. *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI"=Bulletin of the National Research Nuclear University MEPhI*. 2019; no. 8(5): pp. 480-486. <https://doi.org/10.1134/S2304487X1905002X> (In Russ.).
20. Kalenchuk-Porkhanova A. Best Chebyshev approximation for compression of big information arrays. In. *Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference named after A. I. Kitov "Information Technologies and Mathematical Methods in Economics and Management (IT&MM-2020)"*. October 15-16, Moscow: Russia. 2020. pp. 1-13. Available at: <http://sunsite.informatik.rwth-aachen.de/ftp/pub/publications/CEUR-WS/Vol-2830.zip.paper25.pdf>.
21. Chekushkin V.V., Mikheev K.V. Fast search algorithms for the best approximation polynomials for reproduction of functional dependences in data-measurement systems. *Measurement Techniques*, 2016, no. 59(4), pp. 351-356. DOI: 10.1007/s11018-016-0970-9.
22. Loktionov A.P. Improving the polynomial approximation of an object characteristic that is not directly measurable by using measurement reduction. *Measurement Techniques*, 2017, no. 59(10), pp. 1042-1050. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1089-3>.

23. Balakin D. A., Pyt'ev Yu. P. Measurement reduction in the presence of subjective information. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2018, no. 30(12), pp. 84-110. <http://www.mathnet.ru/links/8979c74fdee02631a8d8ed00b41bb7be/mm4028.pdf>.

24. Loktionov A.P. [On numerical differentiation with polynomial approximation]. *Dep. at VINITI* 28.06.99, no. 2080-B99. 1999, 28 p. <https://elibrary.ru/item.asp?id=24302755> (In Russ.).

25. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Shershneva E.O., Breus I.V. Approximation methods for the actual trajectory of load carried by overhead crane to the required one – a comparative analysis. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, 2016, no. 10(2), pp. 45-56. Available at: http://www.sscm.kg.ac.rs/jsscm/downloads/Vol10No2/Vol10No2_05.pdf.

26. Yang C. Sensor placement for structural health monitoring using hybrid optimization algorithm based on sensor distribution index and FE grids. *Structural Control and Health Monitoring*, 2018, no. 5(6), pp. 1-19. <https://doi.org/10.1002/stc.2160>.

27. Favorskaya A.V., Petrov I.B. Grid-characteristic calculation of multistorey buildings destruction. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2020, no. 32(3), pp. 102-114. <https://doi.org/https://doi.org/10.20948/mm-2020-03-06>.

28. Loktionov A.P. Information system for analysis of beam elements under combined load. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*, 2021, no. 2, pp. 45-52. <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2021.2.45.52>.

29. Petrov V.V. [Nonlinear Incremental Structural Mechanics]. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2020. 484 p. *Electronic library system IPR BOOKS*: [site], Available at: <https://www.iprbookshop.ru/98391.html> (In Russ.) (accessed 15.09.2021).

30. Danilov M. F., Savel'eva A. A. Analysis of basic data of unstable problems of coordinate measurements of geometrical parameters of products. *Measurement Techniques*, 2018, no. 61(6), pp. 588-594. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1469-3>.

31. Kalitkin N.N., Kolganov S.A. [Construction of approximations that satisfy the Chebyshev alternance]. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha = Keldysh Institute PREPRINTS*. 2020; no. 91: 33 p. https://keldysh.ru/papers/2020/prep2020_91.pdf (In Russ.).

32. Agafonova I.V., Malozemov V.N. [Extremal polynomials connected with Zolotarev polynomials]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Astronomiya = Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*. 2020; no. 7(65): is. 1, pp. 3-14. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2020.101> (In Russ.).

33. Malozemov V.N., Tamasyan G.SH. [A study on a polynomial filter problem ($n = 3$)]. *V kn.: Izbrannye leksii po ehkstremaal'nym zadacham*. [Selected lectures on extremal problems]. Saint-Petersburg, 2017; pp. 305–315. Available at: <http://www.apmath.spbu.ru/cnsa/rep15.shtml#0312> (In Russ.).

34. Ibrahimoglu B.A. Lebesgue functions and Lebesgue constants in polynomial interpolation. *Journal of Inequalities and Applications*, 2016, no. 2016:93, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1186/s13660-016-1030-3>.

35. Aliyev M.S. [On a classification of linearly independent systems of functions]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1: Estestvennye nauki* =Herald of Dagestan State University Series 1. Natural Sciences. 2021; no. 36(1), pp. 15-23. <https://doi.org/10.21779/2542-0321-2021-36-1-15-23> (In Russ.).

36. Loktionov A.P. A measuring system for determination of a cantilever beam support moment. *Smart Structures Systems*, 2017, no. 19(4), pp. 431-439. <https://doi.org/10.12989/sss.2017.19.4.431>.

37. Loktionov A.P. Numerical differentiation in the measurement model. *Measurement Techniques*, 2019, no. 62, pp. 673-680. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01677-z>.

Информация об авторе / Information about the Author

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

Разработка генератора псевдослучайных чисел на основе кубических радикалов

М.О. Таныгин¹, Л.С. Крыжевич² ✉, П.С. Зыков²

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

² Курский государственный университет,
ул. Радищева, д. 33, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: Leonid@programist.ru

Резюме

Цель исследования. Главной опасностью при передаче конфиденциальных данных является их утечка. Организации применяют различные меры защиты конфиденциальных данных, в которые входят и принятие нормативных документов для регламентации действий сотрудников, и применение технических средств защиты помещений, и установка программных продуктов. Асимметричные методы обладают высоким уровнем стойкости, но достаточно вычислительно трудоемки. А различные подходы с использованием симметричных криптосистем сталкиваются с проблемами генерации и передачи ключа абонентам. Так возникает противоречие, связанное с криптографическим преобразованием конфиденциальных данных с небольшой вычислительной стоимостью и высоким уровнем защиты. В связи с этим, цель данного исследования заключается в снижении рисков безопасности конфиденциальной информации в организации с помощью повышения эффективности защиты каналов связи от утечки информации криптографическими методами.

Методы. В предложенном методе предлагается при реализации асимметричного алгоритма шифрования на блоки исходного сообщения накладывать цепочку ключей, полученных путем генерации псевдослучайной последовательности на базе кубических радикалов. Этот подход гарантирует отсутствие периодичности чисел в блоках и неограниченную длину псевдослучайной последовательности.

Результаты. Полученные в ходе имитационного моделирования результаты показали, что данные цепочки чисел имеют равномерный характер распределения, могут делиться на блоки произвольной длины и с математической точки зрения не имеют периодичности.

Заключение. В работе показано, что применение рекурсивного алгоритма к генерации ключей позволяет снизить объем вычислительных затрат на 20 %, не теряя в уровне стойкости при одинаковых ключах. Приводится сравнительная таблица, демонстрирующая меньшие вычислительные затраты при одинаковой длине ключа по сравнению с другими популярными алгоритмами.

Ключевые слова: асимметричное шифрование; генератор псевдослучайных последовательностей; кубические радикалы; криптографическая стойкость; криптоанализ.

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

Для цитирования: Таныгин М.О., Крыжевич Л.С., Зыков П.С. Разработка генератора псевдослучайных чисел на основе кубических радикалов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 52-69. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-52-69>.

Поступила в редакцию 06.10.2021

Подписана в печать 02.11.2021

Опубликована 20.12.2021

Development of a Pseudorandom Number Generator Based on Cubic Radicals

Maxim O. Tanygin¹, Leonid S. Kryzhevich² ✉, Peter S. Zykov²

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

² Kursk State University
33, Radishcheva str., Kursk 305000, Russian Federation

✉ e-mail: Leonid@programist.ru

Abstract

Purpose of research. The main danger in the transmission of confidential data is their leakage. Organizations take various measures to protect confidential data, which includes the adoption of regulatory documents to control the actions of employees, and the use of technical means of protecting premises, and the installation of software products. Asymmetric methods have a high level of durability, but are quite computationally time-consuming. In addition, various approaches using symmetric cryptosystems face the problems of generating and transmitting the key to subscribers. Therefore, there is a contradiction associated with the cryptographic transformation of confidential data with a small computational cost and a high level of protection. In this regard, the purpose of this study is to reduce the security risks of confidential information in the organization by increasing the effectiveness of protecting communication channels from information leakage by cryptographic methods.

Methods. In the proposed method, when implementing an asymmetric encryption algorithm, it is suggested to impose a chain of keys on the blocks of the original message obtained by generating a pseudo-random sequence based on cubic radicals. This approach guarantees the absence of periodicity of numbers in blocks and an unlimited length of a pseudo-random sequence.

Results. The results obtained during the simulation showed that these chains of numbers have a uniform distribution, can be divided into blocks of arbitrary length and, from a mathematical point of view, have no periodicity.

Conclusion. The paper shows that the application of a recursive algorithm to key generation reduces the amount of computational costs by 20%, without losing the level of durability for identical keys. A comparative table is provided that demonstrates lower computational costs with the same key length as compared to other popular algorithms.

Keywords: asymmetric encryption; pseudorandom sequence generator; cubic radicals; cryptographic strength; cryptanalysis.

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

For citation: Tanygin M. O., Kryzhevich L. S., Zykov P. S. Development of a Pseudorandom Number Generator Based on Cubic Radicals. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 52-69 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-52-69>.

Received 06.10.2021

Accepted 02.11.2021

Published 20.12.2021

Введение

Каналы связи облегчают передачу информации между пользователями и устройствами по всему миру. Растущее внедрение систем мобильной связи размывло изоляцию коммуникационных и вычислительных устройств от унифицированных информационных и коммуникационных систем. Это быстрое развитие и объединение коммуникационных и вычислительных технологий также открыло множество векторов для атак, многочисленных угроз и уязвимостей.

Каналы связи, используемые компаниями, продолжают расширяться по мере совершенствования технологий. Они дают работникам возможность сотрудничать и общаться как никогда раньше. Это делает компании более продуктивными и эффективными. Важные и конфиденциальные корпоративные данные проходят через мессенджеры, социальные сети, мобильные устройства и электронную почту. Следовательно, для специалиста по безопасности важно понимать и применять подходящие меры безопасности для устранения современных угроз и уязвимостей в коммуникационных технологиях [1].

Защита конфиденциальной информации от утечки – залог информационного здоровья любой компании, от небольшого юридического офиса до гигантского транснационального холдинга. Функционирование компаний в любой сфере

деятельности связано с электронным документооборотом [2]. Это значит, что обработке могут подлежать персональные данные и коммерческая тайна, а значит требуется достаточная защита информации во избежание утечек.

Цель данного исследования заключается в снижении рисков безопасности конфиденциальной информации в организации с помощью повышения эффективности защиты каналов связи от утечки информации криптографическими методами.

Объектом исследования является передача конфиденциальной информации в компании по разработке программного обеспечения.

Предмет исследования – защита конфиденциальных данных от несанкционированного доступа при ее пересылке заказчику.

Материалы и методы

Фундаментальной задачей компьютерной безопасности является контроль информационного потока, будь то защита конфиденциальной информации от утечки или защита доверенной информации от искажения (рис.1).

Фактически, почти все организации, работающие с конфиденциальной информацией, например финансовые учреждения, военные учреждения или биржевые брокеры, сталкиваются с огромной проблемой обнаружения утечки [3] инсайдерской информации (табл.1).

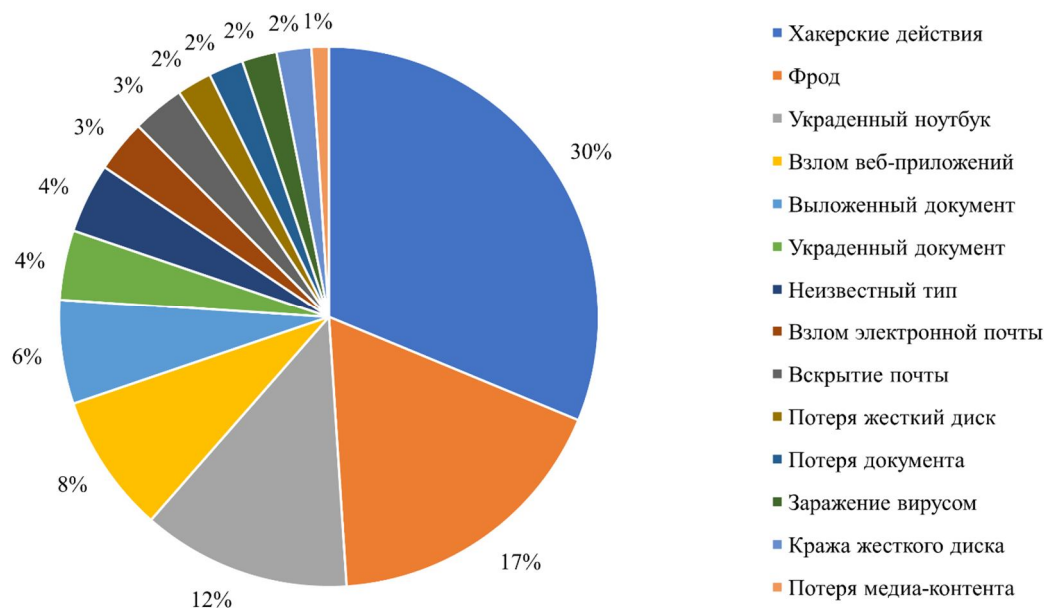


Рис. 1. Статистика по видам утечек

Fig. 1. Statistics on types of leaks

Таблица 1. Объекты, скомпрометированные в процессе атаки (в % от общего числа утечек/объема украденной информации)

Table 1. Objects compromised during the attack (in % of the total number of leaks/volume of stolen information)

Тип устройства / Device Type	Категория / Category	Все организации / All organizations	Крупные организации / Large organizations
POS-server	Серверы	50 / 1%	2 / <1%
POS terminal	Пользовательские устройства	35 / <1%	2 / <1%
Рабочая станция	Пользовательские устройства	18 / 34%	12 / 36%
Банкомат	Пользовательские устройства	8 / <1%	13 / <1%
Сервер Web-приложений	Серверы	6 / 80%	33 / 82%
Сервер СУБД	Серверы	6 / 96%	33 / 98%
Рядовые пользователи	Люди	3 / 1%	5 / <1%
Почтовый сервер	Серверы	3 / 2%	10 / 2%
Файловый сервер	Серверы	1 / <1%	5 / <1%
Ноутбуки	Люди	1 / <1%	5 / <1%
Сервер удаленного доступа	Серверы	1 / <1%	7 / <1%

Безопасность данных можно обеспечить с помощью их криптографических преобразований. Полагаясь на мнение специалиста по защите данных [4], можно говорить о том, что стремительное и динамичное развитие информационных технологий помимо всех имеющихся достоинств приводит также к появлению все большего количества угроз, уязвимостей и нарушителей, а значит есть необходимость усовершенствования и усиления систем обеспечения безопасности для защиты конфиденциальных сведений, коммерческой тайны от утечки.

Криптографические методы защиты данных

Для полной и адекватной защиты данных от несанкционированного доступа, необходимо применить как организационные меры, подразумевающие грамотную организацию режима допуска, методов, средств и мероприятий, снижающих уязвимость информации, так и технические меры. Но помимо применения организационных мер защиты ресурсов компании следует использовать технические, физические и программные средства [5].

Проверенный временем и опытом многих компаний способ защиты данных от несанкционированного доступа и утечки является использование криптографических преобразований, а если быть более точными – шифрования.

Повсеместное использование криптосистем привело к необходимости повышения стойкости используемых шиф-

ров. Впервые данный вопрос был проанализирован К. Шенноном в публикации 1949 года. В этой работе ученый сформулировал термин «совершенно стойкий шифр». Используя статистический подход, а именно вероятностную модель шифра, Шеннон доказал возможность существования стойких криптосистем на примере шифра Вернама («одноразовый блокнот») [6], показав, что количество информации можно измерять с помощью меры неопределенности случайной величины X – энтропии $H(X)$:

$$H(X) = \sum_{a: p_x(a) > 0} p_x(a) \log_2 p_x(a),$$

где $p_x(a) = P[X = a]$, означает вероятность того, примет ли X значение a .

Согласно теории Шеннона, описанной в публикации «Математическая теория связи», в симметричных криптосистемах должны выполняться определенные принципы:

- рассеивание (diffusion): один знак открытого текста и один знак ключа должны влиять на более, чем один символ шифротекста;

- усложнение (confusion): криптографическое преобразование должно усложнять взаимосвязи между символами для затруднения восстановления исходных связей.

Также, во избежание атаки типа «противник посередине» (MITM), необходимо учесть условия для передачи ключей шифрования:

- равновероятные ключи, выбираемые из ключевого пространства случайным образом;

– противник, зная алгоритмы шифрования/расшифрования, не сможет взломать шифротекст без конкретного значения секретного ключа (условие Керкхоффа) [7].

Требования к современным крипто-системам расширяют и дополняют теорему Шеннона и имеют следующий вид:

– условие Керкхоффа: криптостойкость шифра не зависит от известности алгоритмов шифрования/расшифрования;

– сообщение можно расшифровать только при знании ключа;

– криптостойкость шифра не зависит от количества исходных данных и соответствующих им шифротекстов;

– дешифрование путем перебора (Brute force) должно требовать количества операций, имеющих нижнюю оценку, вычислительных мощностей, превосходящих возможности современных ЭВМ, или использования дорогостоящих систем;

– любое изменение ключа или исходных данных должно приводить к изменению шифротекста;

– неизменность структуры алгоритма шифрования/расшифрования;

– длина шифротекста должна совпадать с длиной исходного текста;

– если в процессе шифрования используется последовательно несколько ключей, зависимость между ними не должна легко определяться;

– все ключи из ключевого множества должны обеспечивать одинаковую надежную защиту данных.

Очевидно, что нельзя обеспечить стопроцентную безопасность или свести все риски к абсолютному нулю, особенно при использовании компьютерных вычислительных средств и Интернета. Однако необходимо пытаться свести все риски к минимуму, сохранив баланс между безопасностью, удобством использования технологий и ценой на обеспечение сохранности данных [8]. Исходя из всего вышеперечисленного можно прийти к выводу о том, что ассиметричное шифрование позволяет свободно обмениваться данными, что означает минимизацию затрат на обеспечения выделенного канала связи [9], а также сохранение всех преимуществ (например, комфорт при использовании) среды, в которой происходит диалог (мессенджер, почта и т. д.)

Ассиметричное шифрование

Самыми распространёнными и часто используемыми алгоритмами являются: RSA, ECC, протокол Диффи-Хеллмана, схема Эль-Гамала. Также ассиметричное шифрование используется в таких протоколах, как SSH, SSL, TLS: это нужно для установления соединения, передачи ключей симметричного шифрования. Также, ассиметричные методы применяются для формирования электронной подписи, чтобы подтвердить авторство и целостность сообщения [10].

Исходя из всего вышесказанного, можно прийти к выводу о том, что ассиметричное шифрование разрешает

основное ограничение симметричного способа – использование одного ключа [11]. Поэтому для обмена данными можно пользоваться любым каналом связи, не опасаясь MITM-атак. Однако не обошлось и без недостатков: ассиметричные преобразования производятся долго, они гораздо медленнее симметричных.

Алгоритмическая модель шифрования данных

Основываясь на выводах, для обеспечения безопасной передачи данных был выбран ассиметричный способ шифрования, а именно схема Эль-Гамала, поскольку в отличие от RSA, этот алгоритм не имеет патента, а значит не требует взносов за лицензию. Суть этой криптосистемы основана на сложности вычисления дискретных логарифмов.

Генерация ключей в данном алгоритме осуществляется следующим образом:

- генерируется случайное большое простое число p , при этом сообщение m должно быть меньше p ;

- выбирается число g из множества целых чисел, являющееся первообразным корнем p ;

- выбирается случайное число k из множества целых чисел, удовлетворяющее условиям:

$$k \text{ взаимно простое с числом } (p-1), \\ 1 < k < p-1.$$

Для понимания того, как работает алгоритм, необходимо подробно разбирать математические понятия. Перво-

образный корень по модулю p – это такое число из множества целых чисел, при котором

$$g^{\varphi(p)} \equiv 1 \pmod{p},$$

где $\varphi(p)$ – это функция Эйлера;

$$g^l \not\equiv 1 \pmod{p} \text{ при } 1 \leq l < \varphi(p).$$

Для того, чтобы проверить, является ли число g первообразной p , необходимо, чтобы были соблюдены следующие условия:

Числа g и p – взаимно простые;

$$g^{\varphi(p)/2} \not\equiv 1 \pmod{p}$$

$$g^l \not\equiv 1 \pmod{p} \text{ для всех } l = \frac{\varphi(p)}{m}, \text{ где}$$

m – это простой делитель $\varphi(p)$.

Шифрование производится следующим образом:

- отправитель и получатель генерируют секретные ключ k и q соответственно;

- отправитель и получатель рассчитывают открытые ключи и обмениваются ими:

$r_1 = g^k \pmod{p}$ – открытый ключ отправителя,

$r_2 = g^q \pmod{p}$ – открытый ключ получателя;

- отправитель выполняет преобразование:

$c = m \cdot r_2^k \pmod{p}$, где m – исходное сообщение;

получатель выполняет обратное преобразование:

$$m' = c \cdot (r_1^q)^{-1} \pmod{p} = c \cdot r_1^{p-1-q} \pmod{p}.$$

Модернизация алгоритма Эль-Гамала на разделяемых ключах

Для модернизации алгоритма было принято решение генерировать не одну пару ключей для всего текста, а множество псевдослучайных ключей для каждого блока текста (вплоть до отдельного символа для потокового шифрования), в этом случае длина ключа будет равна длине текста, что значительно повысит криптостойкость алгоритма [12].

Поскольку главной проблемой асимметричных способов шифрования является низкая скорость преобразований, то было принято решение вычислять операции возведения в степень по бинарному методу возведения в степень с остатком, которые выполняются в памяти компьютера значительно быстрее.

Таким образом, усовершенствованный алгоритм шифрования выглядит следующим образом:

Выбор p – большого числа из множества простых чисел;

Выбор g – первообразного корня p ;

Генерация цепочки случайных чисел K , мощность множества определяется длиной текста.

Расчет множества открытых ключей $R1$ по формуле

$$R1_i = g^{K_i} \pmod{p}$$

Получение от получателя множества открытых ключей $R2$, мощность которого определяется длиной текста.

Шифрование каждого блока по формуле

$$c_i = m_i \cdot R2_i^{K_i} \pmod{p}.$$

Передача получателю множества $(C, R1)$.

Соответственно обратный алгоритм выглядит следующим образом:

Выбор p – большого числа из множества простых чисел;

Выбор g – первообразного корня p ;

Генерация множества случайных чисел G , мощность множества определяется длиной текста.

Расчет множества открытых ключей $R2$ по формуле

$$R2_i = g^{G_i} \pmod{p}.$$

Получение от получателя множества открытых ключей $R1$, мощность которого определяется длиной текста.

Шифрование и расшифрование каждого блока по формуле

$$c_i = m_i \cdot R2_i^{K_i} \pmod{p};$$

$$m'_i = c_i \cdot R1_i^{p-1-K_i} \pmod{p}.$$

Для дополнительного повышения криптостойкости алгоритма, было решено использовать для генерации случайных чисел k и q не встроенные методы генерации случайных чисел, а использование бесконечной псевдослучайной последовательности [13]. То есть, созданная последовательность должна казаться постороннему наблюдателю совершенной случайной, но давать возможность получателю сгенерировать её заново по определённому алгоритму.

В итоге, необходимо создание бесконечных, непериодических, псевдослучайных последовательностей [14].

Ярким примером такой последовательности может служить дробная часть иррационального числа. Иррациональные числа обладают следующими нужными нам свойствами:

1) обладают дробной частью бесконечной длины;

2) в дробной части числа нельзя выделить период (в отличие от рациональных чисел);

3) могут быть получены с помощью математических операций (извлечение корня, вычисления синуса, косинуса, тангенса или других тригонометрических операций, вычисление логарифма) [15].

В данной работе взят за основу метод последовательного нахождения радикала. Встроенные функции в различных языках программирования дают до 7-8 знаков после запятой (в редких случаях она достигает 19 знаков). Для решения поставленной задачи необходимо сгенерировать длинную цепочку цифр по длине секретного сообщения (может достигать 100 тысяч или даже 10 млн. символов).

Рассмотрим метод для извлечения кубического корня из целого числа:

1. Разобьём число справа налево на разряды по три цифры. Если бы количество цифр в числе было нечётным, то при разбиении его на разряды к первой цифре надо приписать нули.

2. Извлекаем кубический корень из старшего разряда с недостатком.

3. Возводим старший разряд в куб и вычитаем из первого разряда.

4. Приписываем к разности следующий разряд и слева от полученного числа ставим черту.

5. Приписываем перед вертикальной чертой удвоенное значение выражения, стоящего после знака « \Rightarrow », оставляя место под цифру, которое обозначим точкой.

6. Теперь необходимо подобрать такое число, на которое нужно умножить предыдущее выражение, чтобы получить выражение, стоящее после черты. Эта цифра будет последующей в итоговом числе.

7. Вычитаем из числа, стоящего после черты, произведение, описанное в предыдущем пункте, и повторим алгоритм, начиная с 5 шага, пока число не закончится.

Блок-схема алгоритма вычисления последовательных цифр представлена на рис. 2, где

p – исходное число,

kol – необходимое количество знаков после запятой,

a – целая часть от арифметического корня из исходного числа,

b – утроенное значение текущего результата,

y – остаток,

x – искомая цифра в числе,

i – номер текущего знака после запятой.

Криптоанализ стойкости алгоритма

Как утверждалось Ф.В. Касиски [16], чтобы шифр был устойчив ко взломам, необходимо равномерное распределение символов в ключе, иначе он может быть подобран глубоким частотным анализом.

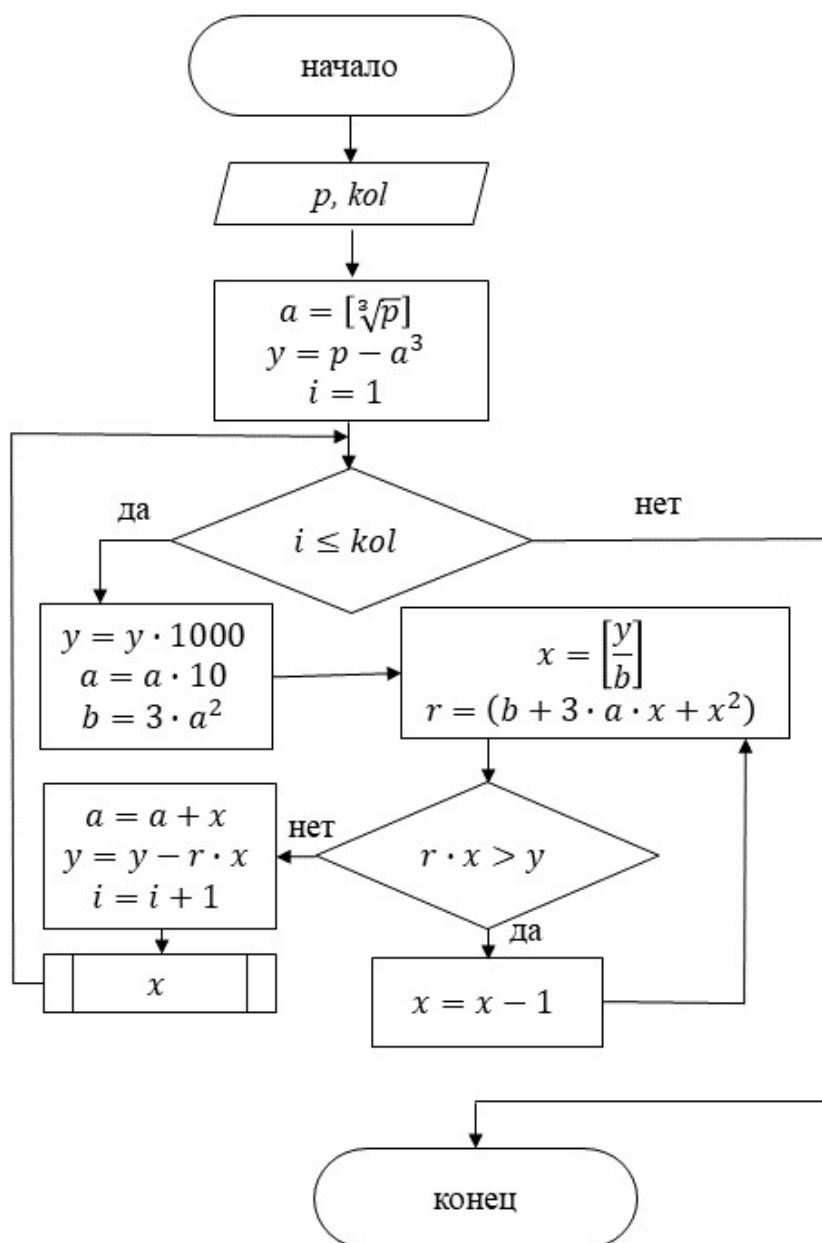


Рис. 2. Блок-схема генерации псевдослучайной последовательности на кубических радикалах

Fig. 2. Block diagram of pseudorandom sequence generation on cubic radicals

Однако в случае использования схемы Эль-Гамала это избегается, поскольку секретные ключи k и q подбираются случайным образом (выбираются из псевдослучайной последовательности), а открытые ключи $R1$ и $R2$ вычисляются с помощью возведения в степень, а дискретное логарифмирование считается

сложной задачей [17]. Рассмотрим гистограмму частот ключа $R1$ для текста в 100 000 символов (рис. 3).

Как видно, столбцы графика приходятся на степени двойки, что не дает вычислить символы по частоте их встречаемости.



Рис. 3. Гистограмма частот

Fig. 3. Frequency histogram

Построим гистограмму частот для чисел k и q , чтобы убедиться, что все цифры после запятой распределены равномерно на примере вычисления корня

из числа 17. Для сохранения криптостойкости проанализируем интервал от 100 до 200 знака после запятой. Получим следующие результаты (рис. 4)

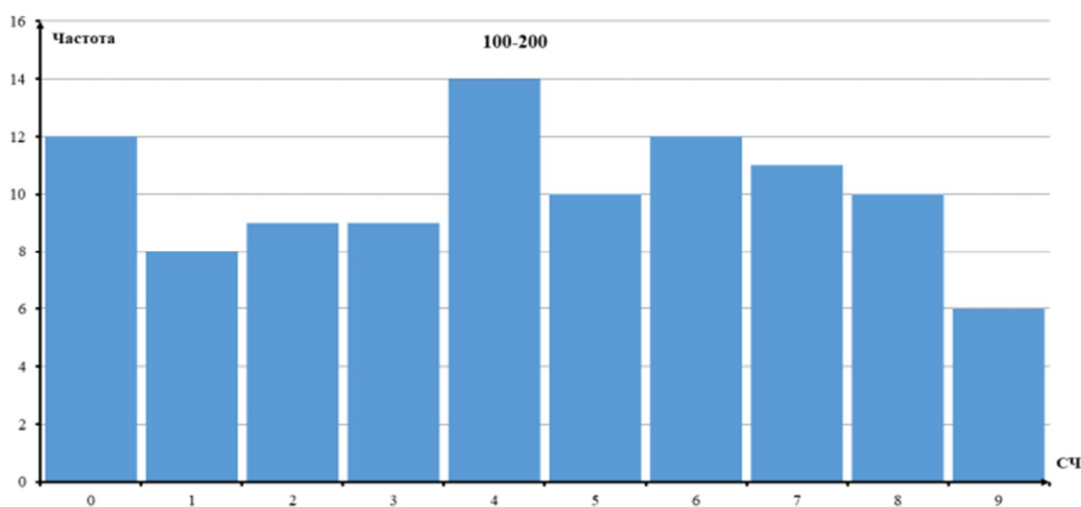


Рис. 4. Гистограмма распределения цифр в интервале от 100 до 200 знака

Fig. 4. Histogram of the distribution of digits in the range from 100 to 200 characters

Частота встречаемости каждой из цифр колеблется около 10, что подтверждает равномерное распределение цифр в радикале числа 3 [18].

Расширим интервал до 50000 знаков после запятой.

По диаграмме (рис. 5) можно обнаружить, что относительная частота встречаемости чисел от 0 до 99 число составляет около 1%, что также подтверждает гипотезу о равномерном распределении чисел после запятой в радикале просто-

го числа. При неизменной длине ключа криптостойкость алгоритма Эль-Гамала равна $2,7 \cdot 10^{28}$ MIPS (англ. million instruction per second – миллион инструк-

ций, осуществляемых процессором за секунду) для ключа 1300 бит [19].

Процесс шифрования текста представлен в табл. 2.

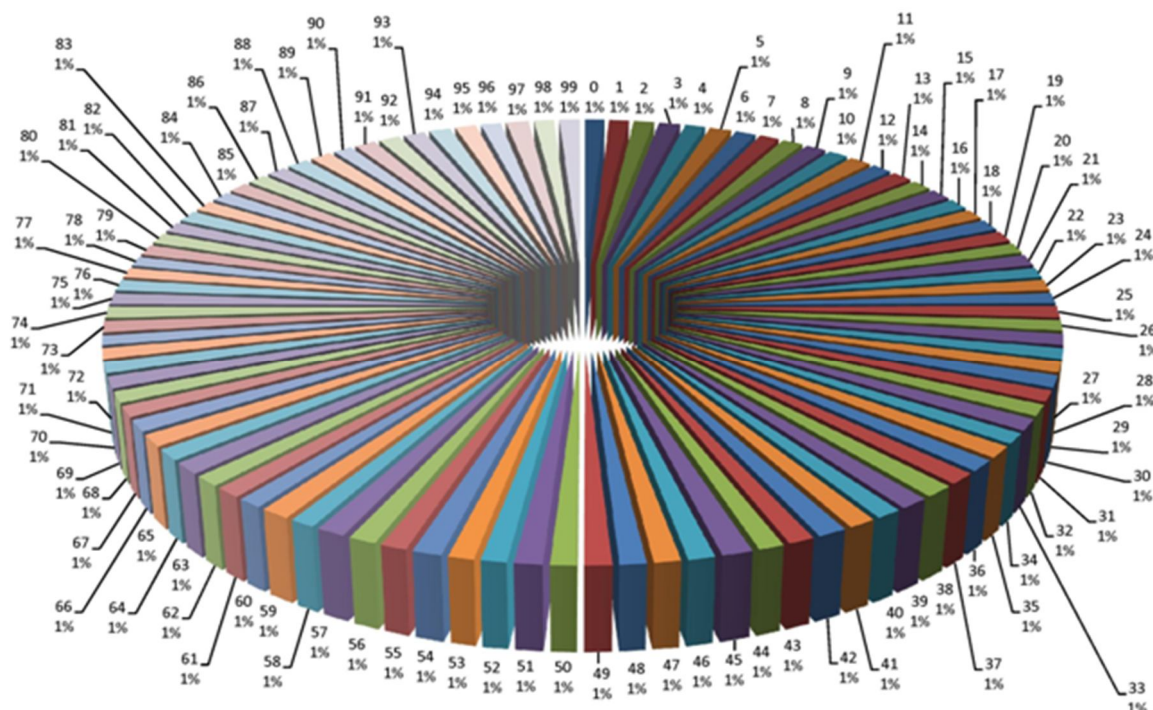


Рис. 5. Диаграмма распределения чисел от 0 до 99 в интервале от 1 до 50000 знака после запятой в радикале числа 17

Fig. 5. Diagram of the distribution of numbers from 0 to 99 in the range from 1 to 50000 decimal places in the radical of the number 17

Как видно из табл. 2, символ шифротекста (c) и открытого ключа (R_{2i}) для одной и той же буквы не совпадает, а значит их нельзя выявить частотным анализом или простым перебором [20].

Результаты и их обсуждение

Таким образом, выбранный алгоритм шифрования Эль-Гамала был усовершенствован разделяемыми ключами для большей криптостойкости, а также была увеличена скорость работы алгоритма, за счет разделения более сложных операций (таких как возведение в степень) на простые составляющие.

Полученные в ходе имитационного моделирования результаты показали, что данные цепочки чисел имеют равномерный характер распределения, могут делиться на блоки произвольной длины и с математической точки зрения не имеют периодичности [21].

Выводы

Таким образом, было выявлено, что защита данных от утечки в любой компании – комплексный вопрос [22], имеющий большое значение для бизнес-процессов организации.

Таблица 2. Процесс шифрования текста**Table 2.** Text encryption process

	m	k	r ₁	q	r ₂	c
В	1042	73	487	53	6443	3520
	32	66	1408	51	5206	745
л	1083	40	3047	73	487	3102
е	1077	38	6327	61	6521	4144
с	1089	20	2892	84	3304	2261
у	1091	12	5955	19	964	2438
	32	68	5935	38	6327	4142
р	1088	32	2088	98	2572	105
о	1086	20	2892	2	9	1175
д	1076	48	2688	52	2144	3347
и	1080	21	1939	93	371	2163
л	1083	91	3784	95	3339	393
а	1072	94	1113	89	1169	2487
с	1089	89	1169	57	2243	3608
ь	1100	75	4383	92	4615	6344
	32	90	3507	40	3047	3668
ё	1105	23	3977	23	3977	2199
л	1083	90	3507	52	2144	3461
о	1086	36	703	57	2243	1909
ч	1095	69	4331	49	1327	2073
к	1082	40	3047	97	3103	2415
а	1072	52	2144	68	5935	106

Таблица 3. Сравнение с аналогичными методами**Table 3.** Comparison with similar methods

Критерии / Criteria	Метод гаммирования / XOR cipher technique	Метод RSA / RSA Method	Метод Эль-Гамала / ElGamal technique	Метод на радикалах / Method based on radicals
Длина ключа	2048 бит	2048 бит	2048 бит	2048 бит
Криптостойкость	$3,2 \cdot 10^{615}$ MIPS	$1,8 \cdot 10^{308}$ MIPS	$3,2 \cdot 10^{615}$ MIPS	$3,2 \cdot 10^{615}$ MIPS
Мин. ширина блока	8 бит	256 бит	256 бит	16 бит
Время обработки при мин. ширине	256	256	2048	256
Макс. ширина блока	16 бит	2048 бит	2048 бит	1024 бит
Время обработки при макс. ширине	128	1408	15488	6400

В ходе выполнения работы была проведена деятельность по снижению рисков безопасности конфиденциальной информации в организации с помощью повышения эффективности защиты каналов связи от утечки информации криптографическими методами [23].

Для достижения этой цели были решены следующие научно-технические задачи:

- были определены виды каналов связи, выявлены и проклассифицированы потенциальные угрозы и уязвимости;
- были рассмотрены и изучены существующие технические меры и мето-

ды по защите конфиденциальной информации. Было выявлено, что актуальные способы защиты также имеют ограничения, а значит есть потребность в создании новых методов защиты данных;

– для защиты каналов связи от утечки информации была предложена усовершенствованная схема Эль-Гамала на разделяемых ключах;

– применение рекурсивного алгоритма к генерации ключей позволяет снизить объем вычислительных затрат не теряя в уровне стойкости при одинаковых ключах.

Список литературы

1. Kalinin Maxim, Krundyshev Vasilii, Zegzhda Peter. Cybersecurity risk assessment in smart city infrastructures // *Machines*. 2021. <https://doi.org/10.3390/machines9040078>.
2. Sukhanova N. Cryptographic information protection in distributed control systems – Science intensive technologies in mechanical engineering (2019). <https://doi.org/10.37468/2307-1400-2021-2020-4-68-78>. ISSN: 2307-1400.
3. Metelkov A. About cryptographic information protection measures in the implementation of information technology in the solution of management problems in the social and economic systems – National Security and Strategic Planning (2021). <https://doi.org/10.37468/2307-1400-2021-2020-4-68-78>. ISSN: 2307-1400.
4. Kaminskaya T. E., Kurbanova L. D. Retrospective and Prospects for the Development of Cryptocurrency – *KnE Social Sciences* (2018). <https://doi.org/10.18502/kss.v3i2.1570>.
5. Sukhanova Natalya V., Nakhushev Rakhim S. The Method of the Cryptographic Information Protection in IT -Systems // *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies IT and QM and IS 2019* (2019). <https://doi.org/10.1109/ITQMIS.2019.8928348>.
6. Sarwo B.B.P. Mulyana. Pengamanan file dokumen menggunakan kombinasi metode substitusi dan Vigenere cipher – *ILKOM Jurnal Ilmiah* (2019). <https://doi.org/10.33096/ilkom.v11i3.477.222-230>.
7. Conceptualizing the key features of cyber-physical systems in a multi-layered representation for safety and security analysis / H. Nelson, Carreras Guzman, Morten Wied, Igor Kozine, Mary Ann Lundteigen // *Systems Engineering*. 2020. <https://doi.org/10.1002/sys.21509>

8. Ibrahimov B. G., Humbatov R. T., Ibrahimov R. F. Cryptographic Methods And Means Protection Transmitted Information in Telecommunication Systems // IFAC-PapersOnLine. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.187>
9. Nesterenko A. Yu., Semenov A. M. On the practical implementation of Russian protocols for low-resource cryptographic modules // Journal of Computer Virology and Hacking Techniques. 2020.
10. Korolyov V., Ogurtsov M., Khodzinsky A. Multilevel Identification Friend or Foe of Objects and Analysis of the Applicability of Post-Quantum Cryptographic Algorithms for Information Security // Cybernetics and Computer Technologies. 2020. <https://doi.org/10.34229/2707-451x.20.3.7>. ISSN: 2707-4501.
11. Mohammad U.Q. Makki. A Review on Symmetric Key Encryption Techniques in Cryptography // International Journal of Computer Applications. 2016. <https://doi.org/10.5120/ijca2016911203>.
12. Rozlomii I. O. Researching structure and of cryptographic strength of the modification of gamma cipher // Electronics and Communications. 2016. <https://doi.org/10.20535/2312-1807.2016.21.6.84112>. ISSN: 1811-4512.
13. Beletsky A. Ya. Galois generalized matrices in stream ciphers // Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika). 2020. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v79.i8.20>. ISSN: 19436009.
14. Beletsky A. Generalized pseudorandom generators of the galois and fibonacci sequences // CEUR Workshop Proceedings. 2020.
15. Application of arithmetic coding methods in cryptographic information protection systems / D. Havrylov, O. Shaigas, O. Stetsenko, Y. Babenko, V. Yroshenko // CEUR Workshop Proceedings. 2021.
16. Tungatarova A.T., Borankulova G.S. Cryptographic method of information protection in computer training systems // Theoretical & Applied Science. 2017. <https://doi.org/10.15863/tas.2017.05.49.21>. ISSN: 23084944.
17. Rajan S., Mahendran D. S., John Peter S. Modified AES-256 algorithm with multiple-keys for secure data transmission and persistent storage // International Journal of Advanced Science and Technology. 2019. ISSN: 22076360.
18. Harold F. Tipton, Micki Krause Nozaki. Information security management handbook, sixth edition // Information Security Management Handbook, Sixth Edition. 2016. Vol. 6.
19. Moos T. Unrolled Cryptography on Silicon // IACR Transactions on Cryptographic Hardware and Embedded Systems. 2020. <https://doi.org/10.46586/tches.v2020.i4.416-442>.
20. Xiang Yu, Jing Qiu, Xianfei Yang, Yue Cong, Lei Du. An graph-based adaptive method for fast detection of transformed data leakage in IOT via WSN // IEEE Access. 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2942335>

21. Sujoy Sinha Roy, Angshuman Karmakar, Ingrid Verbauwhede. Ring-LWE: Applications to cryptography and their efficient realization // *Lecture Notes in Computer Science* (including subseries *Lecture Notes in Artificial Intelligence* and *Lecture Notes in Bioinformatics*). 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49445-6_18, ISSN: 16113349.
22. Blagoev I. Neglected Cybersecurity Risks in the Public Internet Hosting Service Providers // *Information & Security: An International Journal*. 2020. <https://doi.org/10.11610/isij.4704>
- 23.. Cryptographic methods of information protection and VPN in IP networks / P.M. Movsarova, H.R. Vizirova, M.A. Bijsultanova, I.I. Gazieva, I.M. Daudov // *Scientific development trends and education*. 2019. <https://doi.org/10.18411/lj-11-2019-38>.

References

1. Kalinin M., Krundyshev V., Zegzhda P. Cybersecurity risk assessment in smart city infrastructures. *Machines*, 2021. <https://doi.org/10.3390/machines9040078>.
2. Sukhanova N. Cryptographic information protection in distributed control systems. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2019. <https://doi.org/10.37468/2307-1400-2021-2020-4-68-78>. ISSN: 2307-1400.
3. Metelkov A.. About cryptographic information protection measures in the implementation of information technology in the solution of management problems in the social and economic systems. *National Security and Strategic Planning*, 2021. <https://doi.org/10.37468/2307-1400-2021-2020-4-68-78>. ISSN: 2307-1400.
4. Kaminskaya T. E., Kurbanova L. D.. Retrospective and Prospects for the Development of Cryptocurrency. *KnE Social Sciences*, 2018. <https://doi.org/10.18502/kss.v3i2.1570>.
5. Sukhanova N. V., Nakhushev R. S.. The Method of the Cryptographic Information Protection in IT -Systems. *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies IT and QM and IS 2019*. <https://doi.org/10.1109/ITQMIS.2019.8928348>.
6. Sarwo B.B.P. Mulyana. Pengamanan file dokumen menggunakan kombinasi metode substitusi dan Vigenere cipher. *ILKOM Jurnal Ilmiah*, 2019. <https://doi.org/10.33096/ilkom.v11i3.477.222-230>.
7. Nelson H., Guzman C., Wied M., Kozine I., Lundteigen M. A.. Conceptualizing the key features of cyber-physical systems in a multi-layered representation for safety and security analysis. *Systems Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1002/sys.21509>
8. Ibrahimov B. G., Humbatov R. T., Ibrahimov R. F. Cryptographic Methods And Means Protection Transmitted Information in Telecommunication Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.187>

9. Nesterenko A. Yu, Semenov A. M.. On the practical implementation of Russian protocols for low-resource cryptographic modules. *Journal of Computer Virology and Hacking Techniques*, 2020.

10. Korolyov V., Ogurtsov M., Khodzinsky A.. Multilevel Identification Friend or Foe of Objects and Analysis of the Applicability of Post-Quantum Cryptographic Algorithms for Information Security. *Cybernetics and Computer Technologies*, 2020. <https://doi.org/10.34229/2707-451x.20.3.7>. ISSN: 2707-4501.

11. Mohammad U.Q. Makki. A Review on Symmetric Key Encryption Techniques in Cryptography. *International Journal of Computer Applications*, 2016. <https://doi.org/10.5120/ijca2016911203>.

12. Rozlomii I. O. Researching structure and of cryptographic strength of the modification of gamma cipher. *Electronics and Communications*, 2016. <https://doi.org/10.20535/2312-1807.2016.21.6.84112>. ISSN: 1811-4512.

13. Beletsky A. Ya. Galois generalized matrices in stream ciphers. *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*, 2020. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v79.i8.20>. ISSN: 19436009.

14. Beletsky A. Generalized pseudorandom generators of the galois and fibonacci sequences. *CEUR Workshop Proceedings*, 2020.

15. Havrylov D., Shaigas O., Stetsenko O., Babenko Y., Yroshenko V.. Application of arithmetic coding methods in cryptographic information protection systems. *CEUR Workshop Proceedings*, 2021.

16. Tungatarova A.T., Borankulova G.S.. Cryptographic method of information protection in computer training systems. *Theoretical & Applied Science*, 2017. <https://doi.org/10.15863/tas.2017.05.49.21>. ISSN: 23084944.

17. Rajan S., Mahendran D. S., John Peter S. Modified AES-256 algorithm with multiple-keys for secure data transmission and persistent storage. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 2019. ISSN: 22076360.

18. Tipton H. F., Micki Krause Nozaki. Information security management handbook, sixth edition. *Information Security Management Handbook, Sixth Edition*, 2016, vol. 6.

19. Moos T.. Unrolled Cryptography on Silicon. *IACR Transactions on Cryptographic Hardware and Embedded Systems*, 2020. <https://doi.org/10.46586/tches.v2020.i4.416-442>.

20. Xiang Yu, Jing Qiu, Xianfei Yang, Yue Cong, Lei Du. An graph-based adaptive method for fast detection of transformed data leakage in IOT via WSN. *IEEE Access*, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2942335>

21. Sujoy Sinha Roy, Angshuman Karmakar, Ingrid Verbauwhede. Ring-LWE: Applications to cryptography and their efficient realization. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49445-6_18, ISSN: 16113349.

22. Blagoev I. Neglected Cybersecurity Risks in the Public Internet Hosting Service Providers. *Information & Security: An International Journal* (2020). <https://doi.org/10.11610/isij.4704>

23. Movsarova P.M., Vizirova H.R., Bijsultanova M.A., Gazieva I.I., Daudov I.M. Cryptographic methods of information protection and VPN in IP networks. *Scientific development trends and education*, 2019. <https://doi.org/10.18411/lj-11-2019-38>.

Информация об авторах / Information about the Authors

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

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

Крыжевич Леонид Святославович, кандидат технических наук, и.о. заведующего кафедрой «Информационная безопасность», Курский государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Leonid@programist.ru

Leonid S. Kryzhevich, Cand. of Sci. (Engineering), Head of Information Security Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: Leonid@programist.ru

Зыков Петр Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Информационная безопасность», Курский государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: petya39b@gmail.com

Peter S. Zykov, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of Information Security Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: petya39b@gmail.com

Синтез алгоритма диагностики работы электроприводов камеры сушки по датчикам температуры

С. В. Прохоров¹, А. А. Шилин¹ ✉, И. А. Примочкин¹

¹ Томский политехнический университет
пр. Ленина, д. 30, г. Томск 634050, Российская Федерация

✉ e-mail: shiiln@tpu.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка метода оценки состояния электроприводов камеры сушки на основе архивных данных с температурных датчиков. Метод включает в себя использование архивных данных, анализ и определение корреляции между изменениями температуры и влажностью воздуха с техническим состоянием вентиляторов и воздушных клапанов. Разработанная математическая модель функционального блока диагностики должна работать в режиме реального времени на основании текущих показаний температуры.

Методы. Метод основан на исследовании экспериментальных данных с применением узкополосных фильтров, блоков усреднения и корреляционных функций для сопоставления спектральных составляющих сигнала управления и отклика в виде температуры на факт совпадения.

Результаты. На основании результатов исследования реализовано техническое решение для ПЛК, позволяющее определить неисправность работы электроприводов камеры сушки без использования дополнительных датчиков потока воздуха и положения заслонок. Решение основано только на данных температурных датчиков. Тестирование работы блока диагностики выполнено в ручном режиме, когда исполнительные элементы не подчиняются контроллеру.

Заключение. Метод может быть полезен для разработчиков систем управления камерами сушки пиломатериалов, поскольку позволяет получать дополнительную диагностическую информацию о технологическом процессе, повышая надёжность системы управления в целом.

Ключевые слова: программируемые логические контроллеры (ПЛК); узкополосный фильтр; корреляция; система управления камерой осушения.

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

Для цитирования: Прохоров С. В., Шилин А. А., Примочкин И. А. Синтез алгоритма диагностики работы электроприводов камеры сушки по датчикам температуры // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 70-83. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-70-83>.

Поступила в редакцию 06.09.2021

Подписана в печать 24.09.2021

Опубликована 20.12.2021

Synthesis of an Algorithm for Diagnosing the Operation of Drying Chamber Electric Drives According to Temperature Sensors

Sergey V. Prohorov ¹, Aleksandr A. Shilin ¹ ✉, Ilya A. Primochkin ¹

² Tomsk Polytechnic University

30, Lenin Ave., Tomsk 634050, Russian Federation

✉ e-mail: shilin@tpu.ru

Abstract

Purpose of research is the development of a method for assessing the condition of drying chamber electric drives based on historical data from temperature sensors. The method includes the use of historical data, analysis and determination of the correlation between changes in temperature and humidity and the technical condition of fans and air valves. The developed mathematical model of the functional diagnostic unit should work in real time based on the current temperature readings.

Methods. The method is based on the study of experimental data using narrow-band filters, averaging blocks and correlation functions to compare the spectral components of the control signal and the response in the form of temperature to the fact of coincidence.

Results. Based on the results of the study, a technical solution for the PLC was implemented, which makes it possible to determine the malfunction of the electric drives of the drying chamber without using additional air flow sensors and the position of the dampers. The solution is based only on temperature sensor data. Testing of the operation of the diagnostic unit is performed in manual mode, when the executive elements are not controlled by the controller.

Conclusion. The method can be useful for developers of control systems for lumber drying chambers, since it allows obtaining additional diagnostic information about the technological process, increasing the reliability of the control system as a whole.

Keywords: programmable logic controllers (PLCs); narrowband filter; correlation; control system of the drying chamber.

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

For citation: Prohorov S. V., Shilin A. A., Primochkin I. A. Synthesis of an Algorithm for Diagnosing the Operation of Drying Chamber Electric Drives According to Temperature Sensors. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 70-83 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-70-83>.

Received 06.09.2021

Accepted 24.09.2021

Published 20.12.2021

Введение

Использование конвекционных камер позволяет сократить время сушки пиломатериала [1,2] от 6-8 месяцев до 2-3 недель. Качество итогового продукта напрямую зависит от соблюдения технологических параметров [3,4]. В настоящее время применяют различные типы подобных установок [5-8]. В рабо-

те рассматривается система с конвекционным способом сушки [9,10]. Способ предполагает наличие закрытого пространства с сырым пиломатериалом, в котором циркулирует с определенной периодичностью в разных направлениях нагретый воздух. При достижении определенного уровня влажности воздуха, система утилизирует его [11]. В

работе исследуются архивные данные за последний год с действующего объекта, который расположен в Томской области. Основным пиломатериалом является кедр.

Для обеспечения качества технологического процесса, необходим контроль таких параметров как: температура, влажность, состояние воздушных клапанов, состояние циркулирующих вентиляторов. Для контроля температуры используется достаточно надежный и устойчивый к агрессивной среде резистивный датчик. В определении остальных параметров использовались измерительные средства такие как: каналный датчик влажности, реле перепада давления и концевые выключатели. Эти датчики подвержены влиянию агрессивной среды и часто выходят из строя из-за нали-

чия множества мелких древесных частиц и пыли, а также высокой влажности.

Надежным решением для оценки влажности является использование дополнительного «мокрого» датчика температуры. Это позволит использовать психометрическую разность для определения влажности [12, 13]. Анализ переходных процессов температур двух датчиков позволяет опытному технологу определять нарушения технологического процесса. При этом оказалось, что для оценки состояния электроприводов и текущей влажности пиломатериала технологу достаточно данных с этих двух процессов. В статье рассматривается задача синтеза алгоритма диагностики состояния электроприводов камеры сушки по рекомендациям технолога.

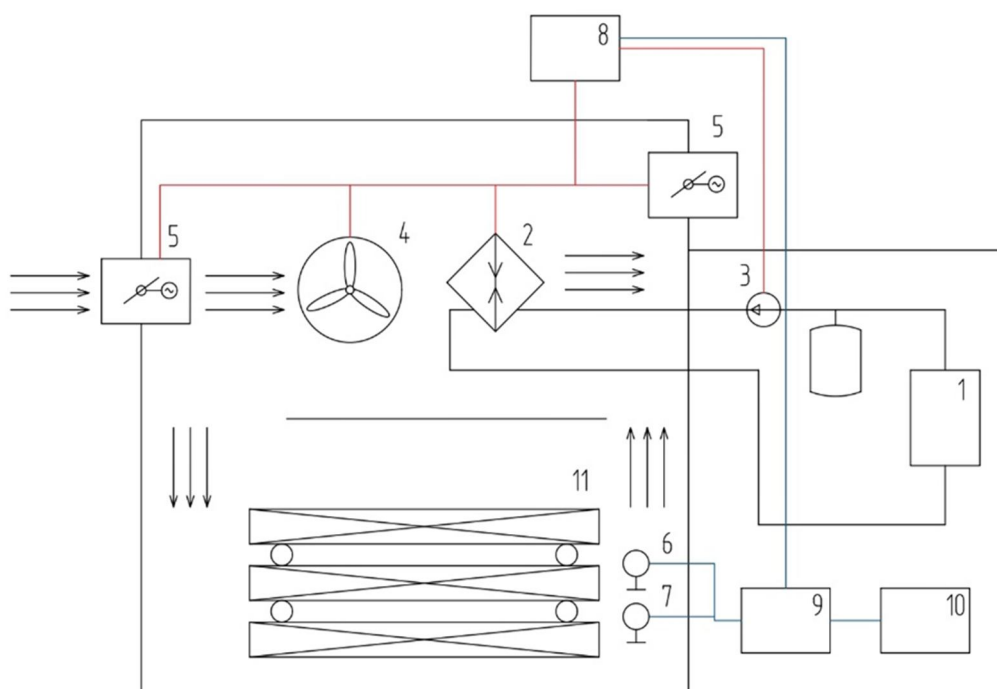


Рис. 1. Структурная схема сушильной камеры

Fig. 1. Block diagram of the drying chamber

Камера состоит из следующих частей (рис. 1): (1) газовый котел, соединенный с калориферами (2) связанные теплоносителем. Движение теплоносителя обеспечивает циркуляционный насос (3). Рядом с калориферами, под потолком, установлены реверсивные вентиляторы (4). В противоположных частях крыши, встроены воздушные клапаны (5). Помимо основных исполнительных устройств в составе системы имеются датчики температуры сухой (6) и влажный (7), средства управления, находящиеся в техническом помещении силовой шкаф (8) управления вентиляторами, насосом и приводами клапанов. Основным устройством контроля является программируемый логический контроллер (ПЛК) (9). В помещении обслуживающего персонала организовано автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора (10). В камере помещен сушаемый пиломатериал (11).

Процесс сушки организован следующим образом: после загрузки в помещение сушки сырых деревянных заготовок, включается газовый котел, который подогревает теплоноситель. Циркуляция последнего осуществляется за счет управляемого насоса. Включаются реверсивные вентиляторы, воздушные потоки снимают тепло с поверхности калориферов и нагревают помещение. При этом направление вращения лопастей двигателя регулярно меняется. Клапаны, установленные в крышу, организуют сброс влажного воздуха, для

уменьшения влажности внутри помещения. При этом стоит отметить, что выброс производится промежутками времени с полностью открытыми клапанами. Управление всеми элементами системы осуществляется ПЛК [14,15]. За состоянием процесса осушения следит оператор с АРМ. Такой режим может уменьшить вероятность замерзания [16, 17] и дальнейшее заклинивание механизма заслонок.

Материалы и методы

Как уже отмечалось, исходными данными для синтеза метода диагностики являются архивные данные измерения сухого и влажного датчиков температуры. На рис. 2 показаны переходные процессы работы камеры сушки пиломатериала в штатном режиме. Под штатным режимом будем считать режим, в котором выполняются условия:

1. Используется автоматический режим управления, где исполнительные устройства подключены к ПЛК.

2. Исполнительные устройства исправны и их влияние на поведение температур сухого и влажного датчика имеет достаточную корреляцию.

На рисунке: T_{dr} – температура сухого датчика, T_{wt} – температура влажного датчика, U_{vnt} – управление двигателями вентиляции, U_{vlv} – положение заслонки. Из рисунка видно, что переходные процессы температур содержат в себе спектр сигналов управления. При этом

на переходном процессе температуры сухого датчика лучше виден спектр сигнала управления вентиляторами, а на графиче-

ске температуры влажного датчика лучше отражён спектр управления положением задвижки.

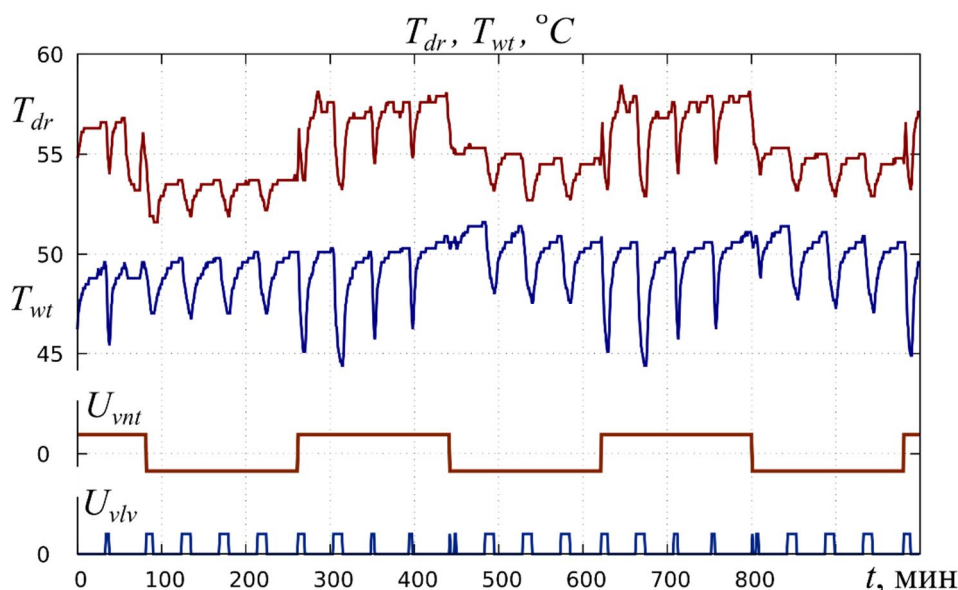


Рис. 2. Переходные процессы сигналов управления и температур

Fig. 2. Transient processes of control signals and temperatures

Для выполнения анализа можно использовать преобразование Фурье, однако для микроконтроллера требования к объёму оперативной памяти может быть не приемлемым. По этой причине предложено воспользоваться априорной информацией о периодичности управляющих сигналов и выполнить анализ с помощью обычных управляемых узкополосных фильтров [18]. Воспользуемся наиболее популярной передаточной функцией подобного фильтра, которая представлена выражением

$$W(s) = \frac{b_1 s}{a_0 + a_1 s + s^2}. \quad (1)$$

Коэффициенты передаточной функции (1) определяются по выражениям:

$$a_0 = \omega_r^2, a_1 = \frac{\omega_r}{Q}, b_1 = a_1 k, \omega_r = \frac{2\pi}{T_p},$$

$$Q = \frac{\omega_r}{(\omega_{\max} - \omega_{\min})}, \quad (2)$$

где ω_r – выделяемая частота из спектра, выраженная в радианах. Для формирования функционального блока ПЛК удобней эту частоту представлять в виде периода T_p и добротности фильтра Q . Физический смысл значения добротности фильтра (2) представлен отношением резонансной частоты к полосе пропускания.

Разностное уравнение можно получить с помощью билинейного преобразования Тастина [19] в общем виде, относительно параметров T_p и Q . Для уменьшения требований к ресурсам ПЛК, разностное уравнение можно получить непосредственно из дифференциального уравнения в форме Коши для выражения (1)

$$\frac{d^2y}{dt^2} = b_1 \frac{dx}{dt} - a_0 y - a_1 \frac{dy}{dt}, \quad (3)$$

заменяв дифференцирование обычным отношением приращений функций выхода и входа за конечное время дискретизации фильтра. В результате получим из (3) пригодное для программирования фильтра выражение разностного уравнения

$$y_0 = (2y_1 - y_2) + b_1 t_d (x_0 - x_1) - a_0 t_d^2 y_1 - a_1 t_d (y_1 - y_2), \quad (4)$$

где t_d – время дискретизации фильтра, y_0, y_1, y_2 – текущее, прошлое и позапрошлые значения выхода, x_0, x_1 – текущее и прошлые значения входа.

На рис. 3 показаны переходные процессы сигналов на выходе узкополосных фильтров, построенных в виде функциональных блоков на базе выражения (4), где в качестве параметров приняты T_p и Q , вычисленные согласно (2).

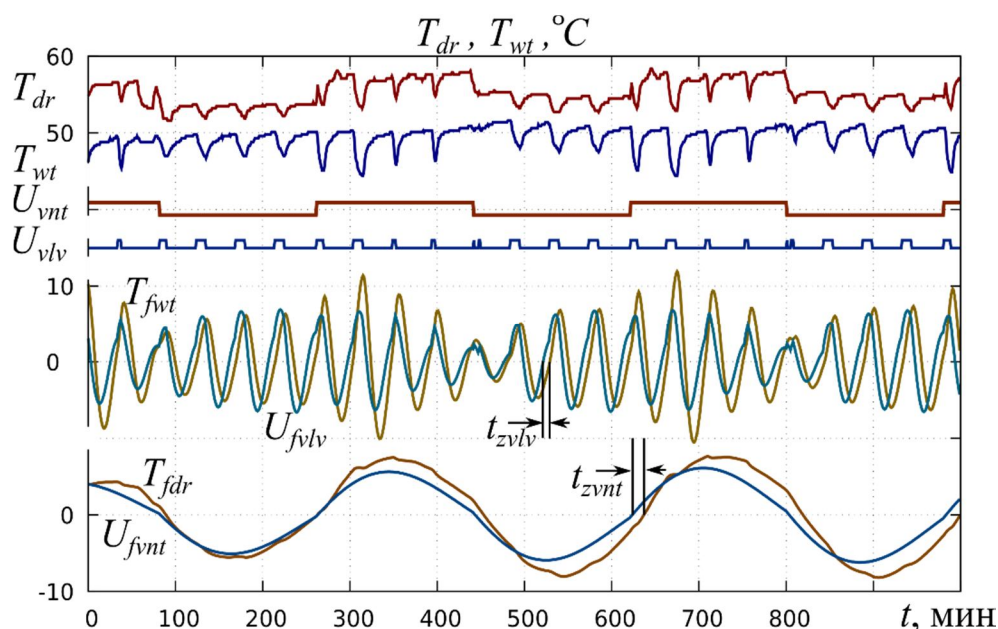


Рис. 3. Переходные процессы на выходе узкополосных фильтров

Fig. 3. Transients at the output of narrowband filters

Как видно из рис. 3 сигналы управления и температуры имеют весьма похожую спектральную составляющую на выходе фильтров при этом наблюдается чувствительное смещение по фазе, выраженное значениями ($t_{zvnt} \approx 15$ м) и ($t_{zvlv} \approx 9$ м). Это связано с инерционными свойствами объекта управления. Поскольку для синтеза алгоритма диагно-

стики достаточно учесть только эффект запаздывания в функциональный блок диагностики включены элементы имитации запаздывания в виде трёх апериодических звеньев 1-го порядка.

На рис. 4 представлен алгоритм реализации блока диагностики на языке непрерывных функциональных схем (CFC) стандарта ИЕС (МЭК)-61131-3 [20].

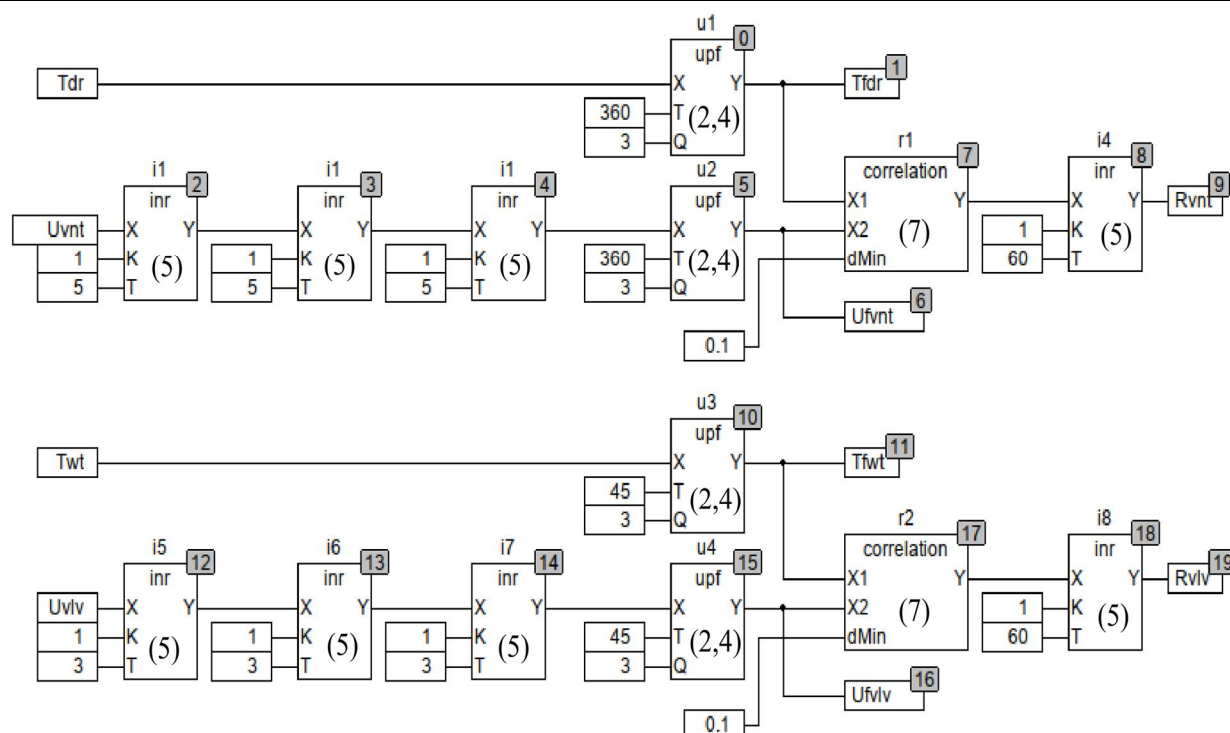


Рис. 4. Алгоритм блока диагностики на языке CFC

Fig. 4. The algorithm of the diagnostic block in the CFC language

Функциональные блоки узкополосных фильтров реализованы согласно выражениям (2) и (4). Аперриодическое инерционное звено представлено разностным уравнением

$$y_0 = y_1 + \frac{t_d(kx - y_1)}{T_o}, \quad (5)$$

где k – коэффициент передачи звена, T_o – время инерции. На рис. 4 также присутствуют блоки вычисления нормированной корреляции сигнала управления и его отклика на значения датчиков температуры. Из классического выражения для вычисления корреляции

$$R(u_{upf}, T_{upf}) = \frac{\sum(u_{upf} T_{upf})}{\sqrt{\sum u_{upf}^2 \sum T_{upf}^2}} \quad (6)$$

принято решение вместо суммы по всей выборке использовать свойство аперри-

одического звена (5) усреднять значения за время выборки примерно равному времени инерции T_o . В выражении (6) u_{upf} и T_{upf} – значения выходов узкополосных фильтров для сигнала управления и температуры соответственно.

Элемент вычисления корреляции без усреднения представлен выражением

$$r_i(u_{upf}, T_{upf}) = \frac{u_{upf} T_{upf}}{\max(|u_{upf} T_{upf}|, \sigma)}, \quad (7)$$

где существует вероятность деления на ноль, которая исключается введением малого значения ($\sigma \approx 0,1$). С выхода элемента вычисления корреляции сигнал поступает на блок усреднения.

На рис. 5 представлены результаты работы блока диагностики в виде переходных процессов в штатном режиме работы камеры сушки.

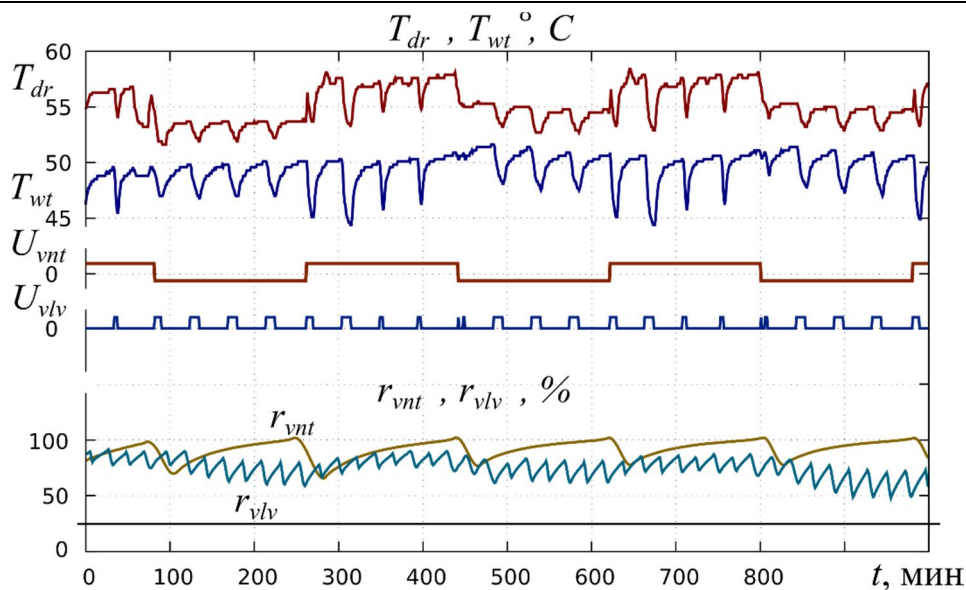


Рис. 5. Переходные процессы на выходах блоков корреляции

Fig. 5. Transients at the outputs of correlation blocks

Сигнал на выходе блока корреляции нормирован относительно единицы, и если принять критический уровень ($\approx 25\%$) корреляции спектра сигналов управления и температуры, то можно сравнивая с ним принять решение о работоспособности электроприводов по каналу управления вентиляцией (r_{vnt}) и положением заслонки (r_{vlv}).

Для тестирования блока диагностики использованы архивные значения сигналов в условиях, когда оператор использовал ручной режим управления. В этом случае блок диагностики должен определить факт несоответствия управления и поведения объекта. На рис. 6 показаны переходные процессы системы в нештатной ситуации.

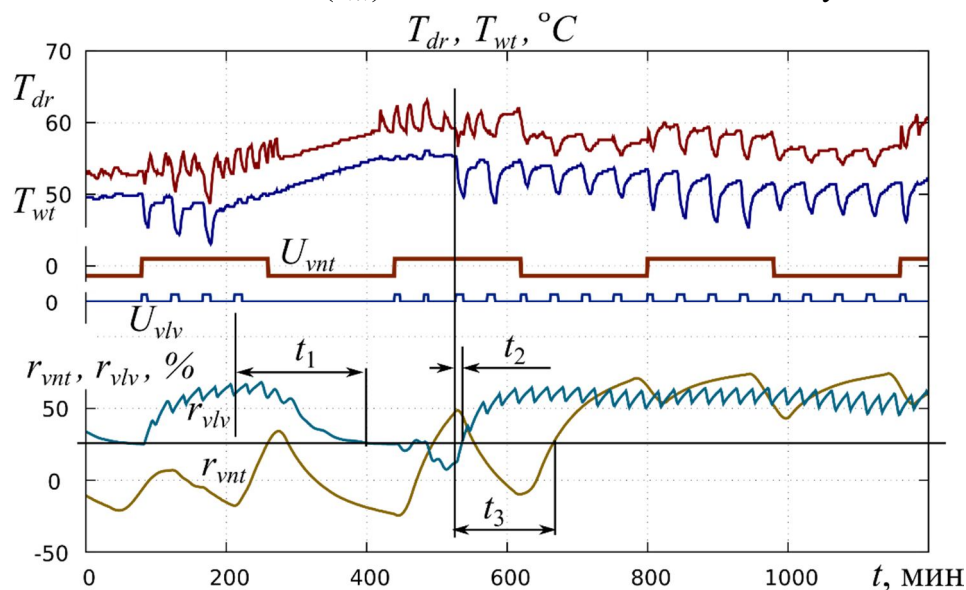


Рис. 6. Переходные процессы при нештатной ситуации

Fig. 6. Transients in an emergency situation

Как видно из рис. 6 выход блоков корреляции адекватно оценивает управляемость объекта и обнаруживает нештатную ситуацию, в самом худшем случае, в течение 80 минут для канала управления положением заслонки. Восстановление штатной ситуации обнаруживается в течение 5-8 минут для канала управления приводами заслонки и в течение 60 минут для канала управления вентиляцией.

Результаты и их обсуждение

Изучение и анализ переходных процессов датчиков температуры в камерах сушки позволяет увидеть и определить основные показатели корректности и качества технологического процесса. Опытный технолог может увидеть в этих переходных процессах работоспособность электроприводов, обобщённую влажность пиломатериала и другие показатели, позволяющие обойтись без дорогостоящих датчиков влажности, наличия потока воздуха. Чтобы формализовать все необходимые аналитические решения и выводы технолога в виде математического представления пригодного для реализации на ПЛК требуется решить достаточно сложную задачу синтеза алгоритма.

В статье решена одна из задач обнаружения нештатной ситуации в каналах управления электроприводами. Метод основан на использовании анализа переходных процессов температур су-

хого и влажного термометра в камере сушки пиломатериала. Решение представлено в виде алгоритма, разработанного на языке SFC, и может быть легко реализовано программистом на большинстве ПЛК, поддерживающие стандарт IEC (МЭК)-61131-3.

Время обнаружения нештатной ситуации может достигать до полутора часов, однако такое время вполне приемлемо если учитывать, что время всего технологического процесса составляет не менее 10 суток.

Выводы

Результаты работы могут быть полезны для разработчиков систем управления камерами сушки пиломатериалов, поскольку предложенный метод позволяет получать дополнительную диагностическую информацию о технологическом процессе, повышая надёжность системы управления в целом. Реализация на ПЛК всех аналитических решений позволяет получить все необходимые показатели процесса сушки.

В частности, решение задачи вычисления влажности пиломатериала из оценок равновесной влажности воздуха камеры при закрытых заслонках позволяет создавать достаточно надёжные и недорогие системы управления сушкой. Однако решение этой задачи выходит за рамки данной статьи и может быть рассмотрено в дальнейших работах.

Список литературы

1. Степка О. Г., Маковецкий Ф. А. Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование процесса микроволновой сушки древесины // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. №. 4-2. С. 215-221. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45842964>
2. Energy saving in a convective dryer by using novel real-time exergy-based control schemes adjusting exhaust air recirculation / S. Zohrabi, M. Aghbashlo, S.S. Seiedlou, H. Scaar, J. Mellmann // Journal of Cleaner Production. 2020. № 120394. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120394>.
3. Рудак О. Г., Короб А. Ю. Исследование характера изменения влажности поверхностных и внутренних слоев древесины сосны при прогреве в ненасыщенной среде // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 1 (240). С. 162–168. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44694941>
4. Гороховский А. Г., Шишкина Е. Е. Синтез оптимальной по быстродействию системы управления сушкой пиломатериалов // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 1 (49). С. 98-103. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44831201>
5. Барахоев М. Н. Сравнительная характеристика способов сушки древесины и определение оптимального варианта среди них // Взгляд молодых исследователей: лесной комплекс, экономика и управление. Красноярск, 2019. С. 13-18. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41437883>
6. Савин А. М., Степанова П. А., Шевелева Е. В. Автоматизация процесса сушки пиломатериалов в вакуумных сушильных камерах // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6. №. 5 (49). С. 126-129. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36702389>
7. Анализ влияния различных факторов на скорость осциллирующей вакуумно-кондуктивной сушки пиломатериалов / Ш.Р. Мухаметзянов, П.А. Кайнов, А.Х. Сафиуллина, П.М. Мазуркин. Воронеж, 2017. С. 8. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29214599>
8. Zheng Z., Keqi W. RBF based sliding mode control method for lumber drying system // Wood and fiber science. 2019. Vol. 51. No. 3. <https://doi.org/10.22382/wfs-2019-028>
9. Нгуен В. В., Шилин А. А., Момот П. М. Метод измерения влажности пиломатериала, реализуемый на ПЛК // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(1): 110-121. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-110-121>.
10. Максименко В. А., Евдокимов В. С., Калита В. С. Разработка метода низкотемпературной сушки древесины // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства. 2020. С. 176-177. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42638236>

11. Максименко В. А., Евдокимов В. С., Ракша И. С. Опытнo-экмпериментальная камера для низкотемпературной сушки древесины // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства. 2021. С. 88-89. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44809521>
12. Касимов Д. В., Заргарян Ю. А. Основные принципы работы систем регулирования температуры и влажности // Вестник молодёжной науки России. 2021. №. 2. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46710429>
13. Куракова П. С., Воропай Н. Н. Сравнение температуры воздуха по данным разных измерительных приборов // Двенадцатое Сибирское совещание и школа молодых ученых по климатoэкологическому мониторингу. Томск, 2017. С. 217-218. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30609906>
14. Компьютерное моделирование визуальных интерфейсов виртуальных инструментов и приборов / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, В.В. Ганджа, С.А. Панов // Научная визуализация. 2016. Т. 8. №. 3. С. 111-131. URL: <http://sv-journal.org/2016-3/09/?lang=ru>
<https://elibrary.ru/item.asp?id=26460847>
15. Cracking the code: real-time monitoring of wood drying and the occurrence of cracks / Н. Р. Botter-Kuisch, J. Van den Bulcke, J. М. Baetens, J. Van Acker // Wood Science and Technology. 2020. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01200-6>
16. Nasr M. R. et al. Experimental methods for detecting frosting in cross-flow air-to-air energy exchangers // Experimental Thermal and Fluid Science. 2016. Т. 77. С. 100-115. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.04.009>
17. Shilin A. et al. IA method for measuring the amount of hoar frost formation in the recuperation channels of ventilation systems using the adjustable mathematical model of this process // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2017. Т. 141. С. 01032. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201714101032>
18. Куликов Р. С., Царегородцев Д. В. Модифицированный алгоритм адаптивного фильтра // Электронные средства и системы управления. 2017. №. 1-1. С. 30-32. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30732318>
19. Хохловский В. Н. и др. Совершенствование процесса разработки программного обеспечения для ПЛК путем генерации кода из созданной математической модели объекта управления // Modern Science. 2020. №. 9-2. С. 347-359. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44003815>
20. Иванова В. Р., Иванов И. Ю., Киселев И. Н. Разработка автоматизированной системы управления с использованием языка программирования стандарта МЭК 61131-3 // Энергобезопасность и энергосбережение. 2020. № 6. С. 44-49. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44401104>

References

1. Stepka O. G., Makovetskii F. A. Komp'yuternoe modelirovanie i ehksperimental'noe issledovanie protsessa mikrovolnovoi sushki drevesiny [Computer modeling and experimental study of the process of microwave drying of wood]. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire = Current scientific research in the modern world*, 2021, no. 4-2, pp. 215-221. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45842964>
2. Zohrabi S., Aghbashlo M., Seiedlou S.S., Scaar H., Mellmann J. Energy saving in a convective dryer by using novel real-time exergy-based control schemes adjusting exhaust air recirculation. *Journal of Cleaner Production*, 2020, no. 120394. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120394>.
3. Rudak O. G., Korob A. Y. Issledovanie kharaktera izmeneniya vlazhnosti poverkhnostnykh i vnutrennikh sloev drevesiny sosny pri progreve v nenasyshchennoi srede [Investigation of the nature of changes in the humidity of the surface and inner layers of pine wood during heating in an unsaturated environment]. *Trudy BGTU. Ser. 1, Lesnoe khozvo, prirodopol'zovanie i pererab. obnovlyaemykh resursov = Proceedings of BSTU. Ser. 1, Forest management, nature management and reworking. renewable resources*. 2021, no. 1 (240), pp. 162–168. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44694941>
4. Gorokhovskii A. G., Shishkina E. E. Sintez optimal'noi po bystrodeistviyu sistemy upravleniya sushkoi pilomaterialov [Synthesis of the optimal speed control system for drying lumber]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = System. Methods. Technologies*, 2021, no. 1 (49), pp. 98-103. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44831201>
5. Barakhoev M. N. [Comparative characteristics of wood drying methods and determination of the optimal option among them]. *Vzglyad molodykh issledovatelei: lesnoi kompleks, ekonomika i upravlenie [The view of young researchers: the forest complex, economics and management]*, Krasnoyarsk, 2019, pp. 13-18 (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41437883>
6. Savin A. M., Stepanova P. A., Sheveleva E. V. Avtomatizatsiya protsessa sushki pilomaterialov v vakuumnykh sushil'nykh kamerakh [Automation of the process of drying lumber in vacuum drying chambers]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika = Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. 2018, vol. 6, no. 5 (49), pp. 126-129. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36702389>
7. Mukhametzyanov S. R., Kainov P.A., Safiullina A.K., Mazurkin P.M. *Analiz vliyaniya razlichnykh faktorov na skorost' ostsilliruyushchei vakuumno-konduktivnoi sushki pilomaterialov [Analysis of the influence of various factors on the speed of oscillating vacuum-conductive drying of lumber]*. Voronezh, 2017, 8 p. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29214599>
8. Zheng Z., Keqi W. RBF based sliding mode control method for lumber drying system. *Wood and fiber science*, 2019, vol. 51, no. 3. <https://doi.org/10.22382/wfs-2019-028>

9. Nguyen V. V., Shilin A. A., Momot P. M. PLC-based lumber humidity measurement method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 110-121 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-110-121>.

10. Maksimenko V. A., Evdokimov V. S., Kalita V. S. Razrabotka metoda nizkotemperaturnoi sushki drevesiny [Development of a method of low-temperature drying of wood]. *Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva = Equipment and technology of petrochemical and oil and gas production*, 2020, pp. 176-177. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42638236>.

11. Maksimenko V. A., Evdokimov V. S., Raksha I. S. Opytno-ekspperimental'naya kamera dlya nizkotemperaturnoi sushki drevesiny [Experimental chamber for low-temperature drying of wood]. *Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva = Equipment and technology of petrochemical and oil and gas production*, 2021, pp. 88-89. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44809521>

12. Kasimov D. V., Zargaryan Yu. A. Osnovnye printsipy raboty sistem regulirovaniya temperatury i vlazhnosti [Basic principles of operation of temperature and humidity control systems]. *Vestnik molodezhnoi nauki Rossii = Bulletin of Youth Science of Russia*. 2021, no. 2. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46710429>

13. Kurakova P. S., Voropai N. N. [Comparison of air temperature according to different measuring instruments]. *Dvenadtsatoe Sibirskoe soveshchanie i shkola molodykh uchenykh po klimatoekologicheskomu monitoringu* [The twelfth Siberian Meeting and the School of young scientists on climate and environmental monitoring]. Tomsk, 2017, pp. 217-218 (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30609906>

14. Dmitriev V. M., Gandzha T.V., Gandzha V.V., Panov S.A. Komp'yuternoe modelirovanie vizual'nykh interfeisov virtual'nykh instrumentov i priborov [Computer modeling of visual interfaces of virtual instruments and devices]. *Nauchnaya vizualizatsiya = Scientific Visualization*, 2016, vol. 8, no. 3, pp. 111-131. <http://sv-journal.org/2016-3/09/?lang=ru> <https://elibrary.ru/item.asp?id=26460847>

15. Botter-Kuisch H. P., Van den Bulcke J., Baetens J. M., Van Acker J. Cracking the code: real-time monitoring of wood drying and the occurrence of cracks. *Wood Science and Technology*, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01200-6>

16. Nasr M. R. et al. Experimental methods for detecting frosting in cross-flow air-to-air energy exchangers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, vol. 77, pp. 100-115. doi:10.1016/j.expthermflusci.2016.04.009

17. Shilin A. et al. IA method for measuring the amount of hoar frost formation in the recuperation channels of ventilation systems using the adjustable mathematical model of this process. *MATEC Web of Conferences. EDP Sciences*, 2017, vol. 141, 01032 p. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201714101032>

18. Kulikov R. S., Tsaregorodtsev D. V. Modifitsirovannyi algoritm adaptivnogo fil'tra [Modified adaptive filter algorithm]. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya = Electronic means and control systems*, 2017, no. 1-1, pp. 30-32. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30732318>

19. Khokhlovskii V. N. Sovershenstvovanie protsessa razrabotki programmno ob'especheniya dlya PLK putem generatsii koda iz sozdannoi matematicheskoi modeli ob'ekta upravleniya [Improving the software development process for PLC by generating code from the created mathematical model of the control object]. *Modern Science*, 2020, no. 9-2, pp. 347-359. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44003815>

20. Ivanova V. R., Ivanov I. YU., Kiselev I. N. Razrabotka avtomatizirovannoi sistemy upravleniya s ispol'zovaniem yazyka programmirovaniya standarta MEHK 61131-3 [Development of an automated control system using the programming language of the IEC 61131-3 standard]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie = Energy security and energy conservation*, 2020, no. 6, pp. 44-49. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44401104>

Информация об авторах / Information about the Authors

Прохоров Сергей Валерьевич, аспирант,
Томский политехнический университет,
г. Томск. Российская Федерация,
e-mail: sergei_prohorov@inbox.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9308-4474>

Sergey V. Prohorov, Post-Graduand Student,
Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russian Federation,
e-mail: sergei_prohorov@inbox.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9308-4474>

Шилин Александр Анатольевич, доктор
технических наук, Томский политехнический
университет, г. Томск. Российская Федерация,
e-mail: shiiln@tpu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4761-7249>

Aleksandr A. Shilin, Dr. of Sci. (Engineering),
Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russian Federation,
e-mail: shiiln@tpu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4761-7249>

Примочкин Илья Анатольевич, магистрант,
Томский политехнический университет,
г. Томск. Российская Федерация,
e-mail: primochkin2012@mail.ru

Ilya A. Primochkin, Master Student,
Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russian Federation,
e-mail: primochkin2012@mail.ru

Структура и схемотехническое решение двунаправленной беспроводной системы передачи энергии для роевых роботов

К. Д. Крестовников¹ ✉, А. В. Семенов², А. А. Ерашов¹

¹ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Б. Морская, д. 67, г. Санкт-Петербург 190121, Российская Федерация

✉ e-mail: k.krestovnikov@iias.spb.su

Резюме

Цель исследования. Развитие роевых робототехнических систем и подходов к одновременному решению задачи группой роботов делает актуальным направление исследований, связанное с распределением энергетических ресурсов между агентами роя. Практическая реализация данных задач требует разработки систем, позволяющих осуществлять передачу энергии между агентами роя. Целью исследования является разработка структуры и схемотехнического решения двунаправленной беспроводной системы передачи энергии на основе резонансного автогенератора.

Методы. Проведен анализ существующих исследований и разработок двунаправленных систем передачи энергии индуктивным методом. Были рассмотрены такие параметры, как передаваемая мощность, эффективность, расстояние передачи энергии.

Результаты. Описан принцип работы разработанного схемотехнического решения в режиме приема и передачи энергии, приведена принципиальная электрическая схема и расчетные соотношения. Получены зависимости эффективности работы системы от передаваемой мощности и от расстояния передачи энергии. Наибольшее значение передаваемой мощности 15,4 Вт достигается при минимальном расстоянии между приемной и передающей частями системы. Наибольшая величина эффективности 59,91% достигается при передаваемой мощности 10,09 Вт.

Заключение. Разработанная структура и схемотехническое решение являются базой для реализации двунаправленной беспроводной системы передачи энергии. Предложенная структура, в составе которой используется повышающий DC-DC преобразователь, позволяет получать напряжение на выходе системы, работающей в режиме приема энергии, равное и выше напряжения источника питания системы, работающей в режиме передачи энергии. Применение представленного решения актуально для передачи энергии между автономными роботами, передачи энергии от источника питания к роботу и в обратном направлении.

Ключевые слова: двунаправленная беспроводная система передачи энергии; роевая робототехника; распределение энергетических ресурсов; резонансный автогенератор; передача энергии.

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

Финансирование: Исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: РФФИ 19-08-01215_А.

Для цитирования: Крестовников К. Д., Семенов А. В., Ерашов А. А. Структура и схемотехническое решение двунаправленной беспроводной системы передачи энергии для роевых роботов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 84-103. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-84-103>.

Поступила в редакцию 15.10.2020

Подписана в печать 20.11.2021

Опубликована 20.12.2021

Structure and Circuit Design of a Bidirectional Wireless Power Transmission System for Swarm Robots

Konstantin D. Krestovnikov ¹ ✉, Aleksandr V. Semenov ², Aleksei A. Erashov ¹

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

² St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
67, Bolshaya Morskaya str., St. Petersburg 190121, Russian Federation

✉ e-mail: k.krestovnikov@iias.spb.su

Abstract

Purpose of research. The development of swarm robotic systems and approaches to the simultaneous solution of the problem by a group of robots makes the direction of research related to the distribution of power resources between swarm agents topical. The implementation of these tasks requires the development of systems that make it possible to transfer power between swarm agents. The aim of the study is to develop the structure and circuit design of a bidirectional wireless power transmission system based on a resonant self oscillator.

Methods. The analysis of existing research and development of bidirectional power transmission systems by inductive method is carried out. The following parameters - transmitted power, efficiency, and power transmission distance were studied.

Results. The principle of operation of the developed circuit design in the mode of receiving and transmitting power is described, the schematic diagram and the design ratios are provided. The dependences of the efficiency of the system on the transmitted power and on the distance of power transmission are obtained. The highest value of the transmitted power of 15.4 W is achieved with a minimum distance between the receiving and transmitting parts of the system. The highest efficiency value of 59.91% is achieved with a transmitted power of 10.09 W.

Conclusion. The developed structure and circuit design are the basis for the implementation of a bidirectional wireless power transmission system. The proposed structure, which uses a step-up DC-DC converter, allows us to obtain a voltage at the output of a system operating in the power reception mode equal to and higher than the voltage of the power supply of the system operating in the power transmission mode. The application of this solution is relevant for the transfer of power between autonomous robots, the transfer of power from the power source to the robot and in the opposite direction.

Keywords: bidirectional wireless power transmission system; swarm robotics; distribution of power sources; resonant self oscillator; power transmission.

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

Funding: The research was carried out with the support of the Russian Foundation for Fundamental Research: РФФИ 19-08-01215_A.

For citation: Krestovnikov K. D., Semenov A. V., Erashov A. A. Structure and Circuit Design of a Bidirectional Wireless Power Transmission System for Swarm Robots. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 84-103 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-84-103>.

Received 15.10.2020

Accepted 20.11.2021

Published 20.12.2021

Введение

В настоящее время активно развивается направление роевой робототехники, в котором отдельных мобильных автономных роботов объединяют в группы для совместного решения определенных задач [1-3]. Зачастую при решении задач группой роботов критерием качества является конечное время их выполнения [4]. Ограниченный ресурс источника питания одного робота делает целесообразным использование подхода с перераспределением энергетических ресурсов внутри группы [5, 6], так как позволяет снизить затраты времени, необходимые для возврата агентов роя к точкам пополнения запаса энергии. Осуществить передачу электрической энергии между агентами роя можно с помощью контактных методов, но в этом случае как правило требуется высокая точность позиционирования, что усложняет сенсорную систему робота. Разъемы и контактные пары требуют защиты от влияния окружающей среды и своевременного обслуживания. Данных недостатков лишены беспроводные системы передачи энергии (БСПЭ), которые находят применение в качестве устройств для беспроводной зарядки аккумуляторов различных автономных систем [7-9].

Использование однонаправленных [10-12] БСПЭ для перераспределения энергии не является эффективным решением, так как для передачи энергии от одного мобильного устройства к другому требуется установка приемной и передающей частей устройства на каждого робота. Помимо этого, подход с передачей энергии роботам с помощью передающей части [13, 14], расположенной на или под поверхностью передвижения роботов, ограничивает рабочую область группы роботов, а также требует подготовительных работ для установки необходимого оборудования. Более практичным решением данной задачи являются двунаправленные БСПЭ, в которых каждая часть системы может использоваться в качестве передающей и приемной.

Одним из примеров двунаправленной БСПЭ является решение, представленное в [15]. В передающей части данной системы используется полумостовой инвертор тока, а в приемной части – выпрямитель на MOSFET транзисторах с удвоением напряжения. Во время работы в режиме обратной передачи энергии выпрямитель на MOSFET транзисторах используется как инвертор, а при передаче энергии от передающей части к приемной, в прямом направлении, работает как неуправляе-

мый выпрямитель. Для достижения плавного переключения инверторных ключей при близких к нулевому уровню значениях напряжения (ZVS), скважность преобразователя поддерживается на уровне 50%, а передаваемая мощность регулируется путем изменения рабочей частоты системы. Для компенсации пульсаций на силовых ключах передающей части устанавливаются последовательно с параллельным LC передающим контуром дополнительный конденсатор, получая тем самым последовательно-параллельный резонансный контур.

Резонансный контур каждой части системы [16] выполнен по последовательно-параллельной схеме. Контур системы настроен на работу на резонансной частоте, а каждый реверсивный выпрямитель работает либо в режиме инвертирования, либо в режиме выпрямления в зависимости от направления передачи энергии. Величина и направление передаваемой энергии определяются углом открытия ключей управляемого выпрямителя. Величина и направление потока энергии между несколькими системами контролируются посредством фазовой и амплитудной модуляции напряжений, которые могут использоваться совместно или по отдельности.

Гибридная система двунаправленной БСПЭ предложена в [17]. Система состоит из двух пар катушек, где одна пара выступает в роли передающей части, а другая – в роли приемной. Передающая и приемная части системы имеют два контура, объединенные на

общем проводе, причем один из контуров построен по последовательной схеме, а другой – по последовательно-параллельной. Такая гибридная концепция позволяет использовать LCL и LC контура для компенсации уменьшения передаваемой мощности из-за осевых смещений приемной и передающей частей системы, поскольку объединенная выходная мощность обоих контуров имеет приблизительно постоянное значение. Система основана на полумостовом преобразователе, который служит либо инвертором, либо выпрямителем в зависимости от направления потока мощности.

В двунаправленной БСПЭ [18] величина передаваемой энергии и ее направление передачи регулируется с помощью фазового сдвига сигналов управления открытием ключей. Данная БСПЭ оснащена датчиком напряжения и частоты в приемной и передающей катушках. В работе предложен ПИ-регулятор, который изменяет частоту работы системы для управления уровнем передаваемой мощности, поэтому рассматриваемая БСПЭ работает не всегда в резонансном режиме, что ведет к снижению ее эффективности.

Двунаправленная беспроводная система малой мощности [19] предлагается к применению для заряда аккумуляторных батарей портативных устройств. В приемной и передающей частях системы используется последовательный резонансный контур и полумостовая схема включения силовых транзисто-

ров, что обеспечивает возможность двунаправленной передачи энергии. Так как при использовании системы могут возникнуть осевые смещения и увеличение воздушного зазора между приемной и передающей катушками, предлагается регулировка рабочей частоты.

Авторами работы [20] разработана собственная интегральная схема, включающая в себя систему управления двунаправленной БСПЭ и реализующая систему передачи энергии от аккумулятора к аккумулятору, с последовательной топологией резонансного контура. Для повышения эффективности БСПЭ энергия передается напрямую от аккумулятора к аккумулятору, минуя цепи питания мобильного устройства.

Структура БСПЭ [21] основана на последовательном резонансном контуре с двунаправленным up/down преобразователем. В режиме передачи энергии управляемые ключи, включенные по схеме моста, работают в качестве инвертора в передающей части, а в режиме приема энергии внутренние диоды MOSFET транзисторов работают в качестве неуправляемого выпрямителя совместно с двунаправленным DC-DC преобразователем.

Большинство двунаправленных БСПЭ относятся к классу систем высокой передаваемой мощности (более 1 кВт), так как предназначены для электротранспорта [8, 22] и иных промышленных применений [23]. В соответствии с проведенным анализом и классификацией автономных роботов [24], системы в

данном диапазоне передаваемой мощности избыточны для большинства автономных мобильных робототехнических систем. Решения с малой передаваемой мощностью, разработанные для применения в мобильной электронике, имеют передаваемую мощность в диапазоне до 10 Вт, что будет достаточно только для роботов малых размеров при приемлемой продолжительности времени заряда их аккумуляторных батарей. Системы средней передаваемой мощности, использование которых актуально в автономной робототехнике, представлены в основном однонаправленными системами и недостаточно широко освещены в исследовательских работах.

Для повышения автономности и перераспределения ресурсов в роевых автономных робототехнических комплексах, а также уменьшения вовлеченности человека в процесс эксплуатации, актуальна разработка двунаправленной БСПЭ средней мощности (от 10 Вт до 400 Вт), которая независимо от взаимного расположения приемной и передающей частей системы будет работать в резонансном режиме с высокими показателями эффективности и передаваемой мощности.

Материалы и методы

Разработанная структура двунаправленной БСПЭ, представленная на рис. 1, выполнена в виде блоков, представляющих приемную и передающую части системы, и их связей с конечным устройством.

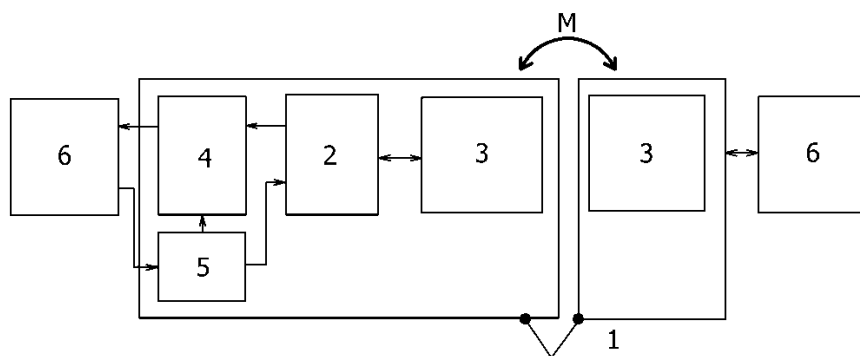


Рис. 1. Структура двунаправленной БСПЭ

Fig. 1. Structure of bidirectional wireless power transfer system

Беспроводная передача энергии осуществляется между двумя конечными устройствами, в которые установлены функциональные блоки 1. Данные блоки имеют электрическое подключение к блокам 6, которые являются источником питания или потребителем энергии в конечном устройстве. Основной частью системы является резонансный автогенератор 2, выход которого связан с резонансным LC-контуром 3. Вход резонансного автогенератора соединен с повышающим DC-DC преобразователем 4, а выход – с потребителем энергии конечного устройства. Цепь управления режимом работы 5 позволяет управлять работой DC-DC преобразователя и электрически соединять источник энергии конечного устройства со входом резонансного автогенератора.

Передача энергии осуществляется методом электромагнитной индукции через индуктивно связанные (на рис. 1 отмечено «М») параллельные резонансные LC-контур. Резонансный LC-контур, в свою очередь, является частотоподающими для автогенератора.

Использование резонансного автогенератора, частотоподающим контуром которого является передающий контур, позволяет поддерживать резонанс в передающем контуре при изменении индуктивности передающей катушки без использования дополнительных систем подстройки частоты. Резонанс в передающем контуре позволяет передавать максимальную мощность в приемную часть. Приемная и передающая части двунаправленной БСПЭ имеют идентичные резонансные контуры, что позволяет избавиться от дополнительных систем подстройки частоты приемного контура для поддержания в нем резонанса при изменении взаимного расположения катушек. Так как взаимное расположение приемной и передающей частей устройства в одинаковой мере влияют на индуктивность и добротность резонансных контуров, а передающий контур является частотоподающим, то оба контура системы передатчик – приемник находятся в резонансе. Это позволяет добиться наилучших показателей по эффективности и передаваемой мощности при любом взаимном распо-

ложении приемной и передающей частей устройства.

Принципиальная схема предлагаемой двунаправленной БСПЭ приведена на рис. 2.

Принцип работы системы в режиме передачи энергии следующий. Конечное устройство 5, в которое установлена двунаправленная БСПЭ 1, имеет собственную систему управления 7.

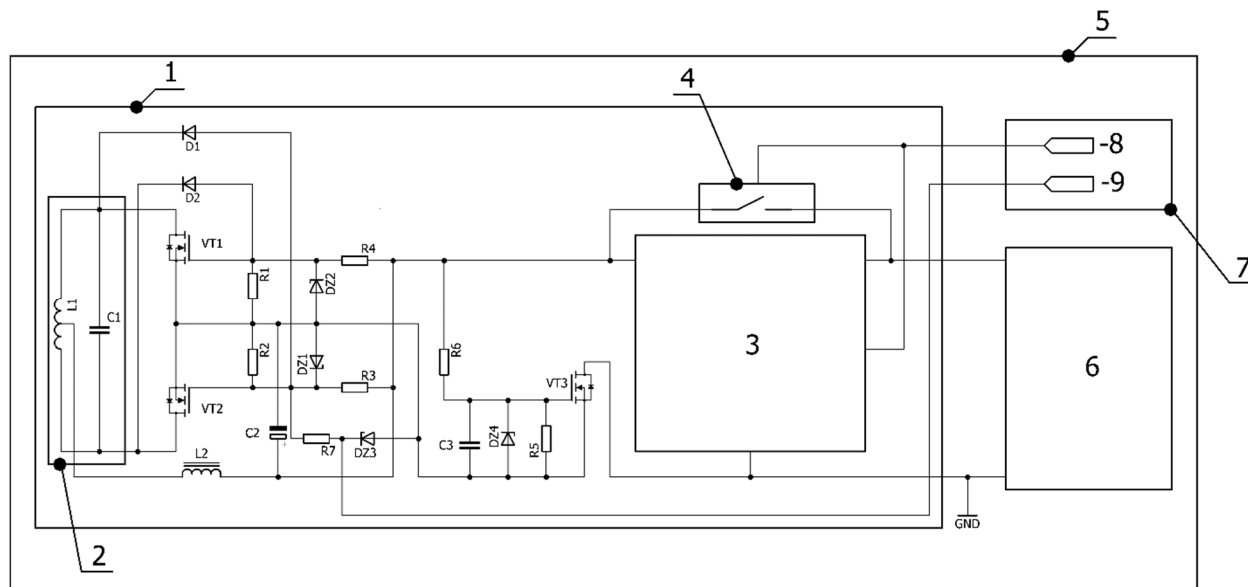


Рис. 2. Принципиальная схема двунаправленной БСПЭ и подключений к конечному устройству

Fig. 2. Schematic diagram of bidirectional wireless power transfer system and connections to the end device

Данная система управления конечного устройства имеет возможность чтения сигнала с цепи контроля частоты 9 и подачи сигнала в цепь выбора режима работы 8 для управления ключевым элементом 4 и повышающим DC-DC преобразователем 3. Система управления конечным устройством проверяет наличие сигнала прямоугольной формы в цепи контроля частоты: если он отсутствует, то системе разрешено подать сигнал в цепь выбора режима работы. При подаче управляющего сигнала в цепь выбора режима работы запрещается работа DC-DC преобразователя, а ключевой элемент замыкает цепь, позволяя протекать току от источника пи-

тания 6 конечного устройства ко входу резонансного генератора, тем самым запуская его работу. После этого в резонансном контуре 2 генерируются незатухающие колебания, а в области катушки L1 появляется переменное магнитное поле. Для обеспечения надежного отпираания транзисторов и снижения динамических потерь эмпирическим путем было выявлено, что расчет необходимой величины затворных резисторов $R_{3,4}$ возможно выполнить по формуле

$$R_{3,4} = \frac{1}{30C_g f}, \quad (1)$$

где C_g – затворная емкость применяемых транзисторов; f – частота работы системы.

Формула (1) получена исходя из того, что заряд затворной емкости должен происходить за 1/10 периода. Принцип работы автогенератора более подробно описан в работе [25]. Методика расчета, представленная в [26], может быть использована для расчета потерь в автогенераторе в режиме передачи энергии, а для расчета потерь в резонансном контуре может быть использована формула

$$P_{LC} = \sqrt{2} I_m^2 (R_l + E_{sr}), \quad (2)$$

где I_m – амплитудная величина тока; R_l – активное сопротивление контурной катушки; E_{sr} – эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора резонансного контура.

Принцип работы системы в режиме приема энергии следующий. Если одна из функциональных частей системы работает в режиме передачи энергии, а вторая попадает в область действия переменного магнитного поля, создаваемого ею, то в катушке L1 индуцируется ЭДС. В резонансном контуре 2 возникают незатухающие колебания с частотой, равной частоте колебаний в резонансном контуре функциональной части системы, которая работает в режиме передачи энергии. Далее индуцированная в L1 ЭДС выпрямляется резонансным автогенератором, который работает в данном режиме как синхронный выпрямитель, и поступает на вход повышающего DC-DC преобразователя. Выход DC-DC преобразователя соединен в данном случае с потребителем энергии конечного устройства.

Напряжение на конденсаторе C2, когда система работает в режиме приема энергии, рассчитывается исходя из формулы

$$U_m = k_{св} \frac{\pi V_{dc}}{\sqrt{2}}, \quad (3)$$

где $k_{св}$ – коэффициент связи между индуктивно связанными приемной и передающей катушками; V_{dc} – напряжение источника питания.

Вышеописанные принципы работы двунаправленной БСПЭ позволяют осуществлять энергетический обмен между конечными устройствами с источниками питания с равным и отличающимся рабочим напряжением. Данное свойство позволяет использовать систему для перераспределения энергетических ресурсов между автономными устройствами, источниками питания которых являются аккумуляторные батареи с равным рабочим напряжением. Такая особенность системы актуальна при ее использовании в конструкции гомогенных роевых роботов, где необходимо перераспределение ресурсов внутри роя [5].

Результаты и их обсуждение

В соответствии с подходом, приведенным в [27], с учетом критерия максимизации магнитного потока было выбрано оптимальное число витков катушек для приемной и передающей частей БСПЭ. Выбранное количество витков катушки соответствует 19 виткам, при этом расчетное действующее значение тока в контуре составляет 2,5 А.

Первичная проверка работоспособности предложенного схемотехнического решения проведена в SPICE-симуляторе. Исходная схема системы была упрощена для модели путем исключения DC-DC преобразователя, в расчетах выходной мощности и эффективности учитывалась его эффективность, принятая 87%. Транзисторы VT3 представлены активным сопротивлением со значением 0,065 Ом в приемной и передающей частях системы. Ключевой элемент 4 был также представлен активным сопротивлением 0,065 Ом в части системы, работающей в режиме передачи энергии. Эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора резонансного контура и активное сопротивление катушки приняты равными 0,01 Ом. Индуктивность приемной и передающей катушек составляла $L1 = 14$ мкГн, емкость резонансного конденсатора $C1 = 0,47$ мкФ. На основе наших предыдущих исследований коэффициент связи катушек приемной и передающей частей системы принят равным $k_{св} = 0,85$, такое значение может быть достигнуто при непосредственной близости катушек. График зависимости эффективности передачи энергии от передаваемой мощности, построенный на основе данных моделирования, представлен на рис. 3.

нансного контура и активное сопротивление катушки приняты равными 0,01 Ом. Индуктивность приемной и передающей катушек составляла $L1 = 14$ мкГн, емкость резонансного конденсатора $C1 = 0,47$ мкФ. На основе наших предыдущих исследований коэффициент связи катушек приемной и передающей частей системы принят равным $k_{св} = 0,85$, такое значение может быть достигнуто при непосредственной близости катушек. График зависимости эффективности передачи энергии от передаваемой мощности, построенный на основе данных моделирования, представлен на рис. 3.

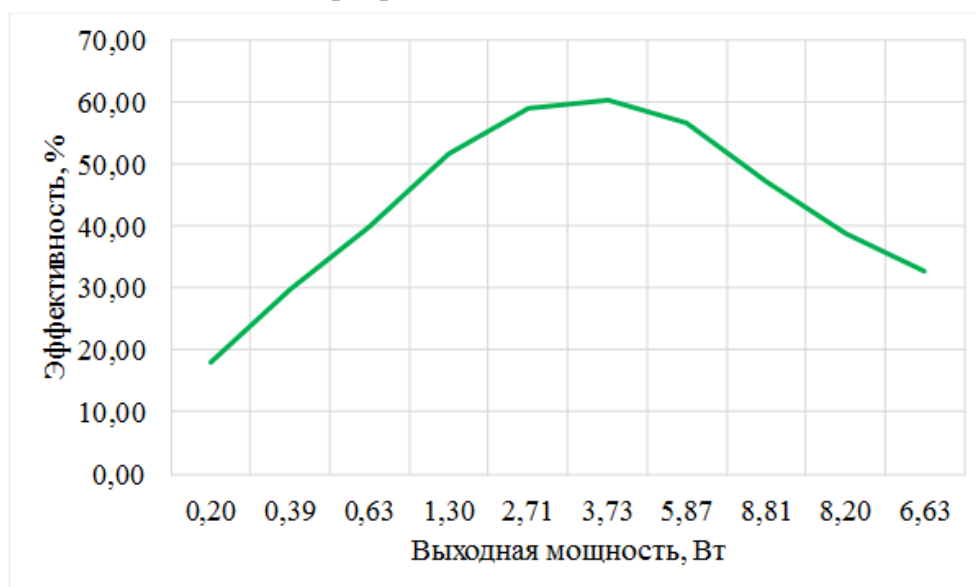


Рис. 3. Зависимость эффективности передачи энергии от передаваемой мощности

Fig. 3. Dependence of the efficiency of power transfer on transferred power

Моделирование работы схемы проводилось на активную нагрузку с сопротивлением от 1 до 250 Ом. Наибольшей выходной мощности 8,81 Вт удалось достичь при сопротивлении нагрузки 2 Ом. Наибольшая эффектив-

ность 60,05% достигается при выходной мощности 3,73 Вт. Напряжение источника питания системы, работающей в режиме передачи энергии, составляло 8,4 В, рабочая частота системы без нагрузки составила ~43 кГц, а макси-

мальный уровень выходного напряжения системы, работающей в режиме приема энергии, достигал 7,56 В.

Проведенное моделирование позволило проверить работоспособность предложенного схемотехнического решения и получить теоретическую зависимость эффективности системы от передаваемой мощности при заданных параметрах и ограничениях.

Для дальнейшей экспериментальной проверки разработанного схемотехнического решения были изготовлены идентичные образцы БСПЭ, внешний вид одного из которых представлен на рис. 4.



Рис. 4. Прототип двунаправленной БСПЭ

Fig. 4. Prototype of the bidirectional wireless power transfer system

Автогенератор реализован на МОП-транзисторах AU1RLR2905Z, DC-DC повышающий преобразователь базируется на микросхеме XL6009, коммутирующие цепи выполнены на МОП-транзисторах FDD6637.

Катушки каждого резонансного контура имеют отвод от середины и намотаны проводом диаметром 0,69 мм. Пользуясь методикой, предложенной в

[28], было рассчитано сопротивление проводника катушки с учетом поверхностного эффекта. На частоте работы системы 45 кГц явление поверхностного эффекта увеличивает сопротивление проводника катушки из 19 витков диаметром провода 0,69 мм (по меди) на 3,12%, что является несущественным для прототипа, изготовленного для апробации предложенной структуры и схемотехнического решения. В качестве конденсатора резонансного контура использовались пленочные MPP конденсаторы с низким значением ESR.

При проведении первого эксперимента в резонансном контуре БСПЭ с фиксированной емкостью конденсатора $C = 0,47$ мкФ была получена зависимость эффективности от передаваемой мощности, которая приведена на рис. 5.

Максимальная эффективность системы достигает 59,91% при передаваемой мощности 10,09 Вт. Максимальная передаваемая мощность составляет 15,4 Вт. Отличие формы полученной кривой от зависимости, приведенной на рис. 3, можно главным образом объяснить разными значениями коэффициента связи между приемным и передающим контурами БСПЭ в моделировании и в экспериментах.

Во втором эксперименте проводилось измерение максимальной передаваемой мощности БСПЭ при изменяемом расстоянии между приемной и передающей катушками. Полученная зависимость передаваемой мощности от расстояния приведена на рис. 6.

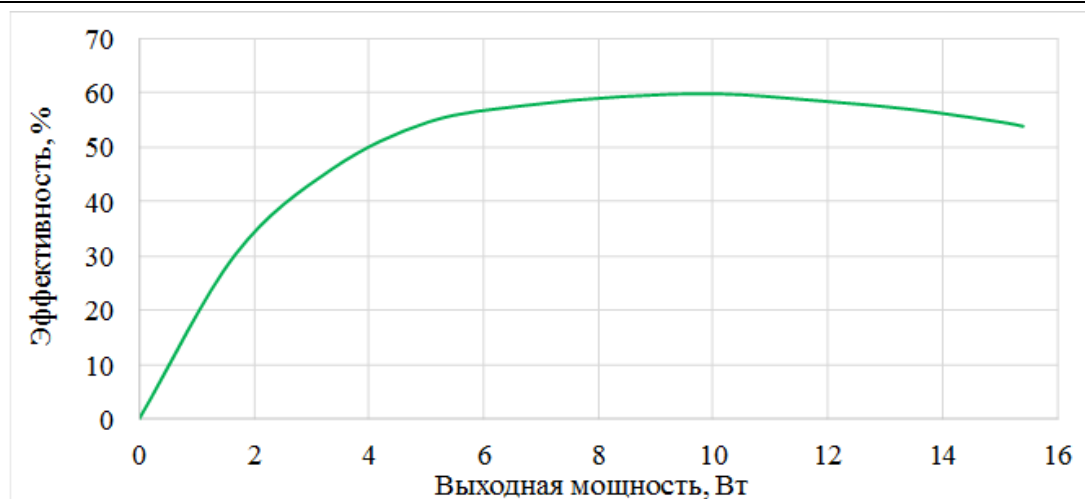


Рис. 5. Зависимость эффективности системы от передаваемой мощности

Fig. 5. System efficiency dependence on the transferred power

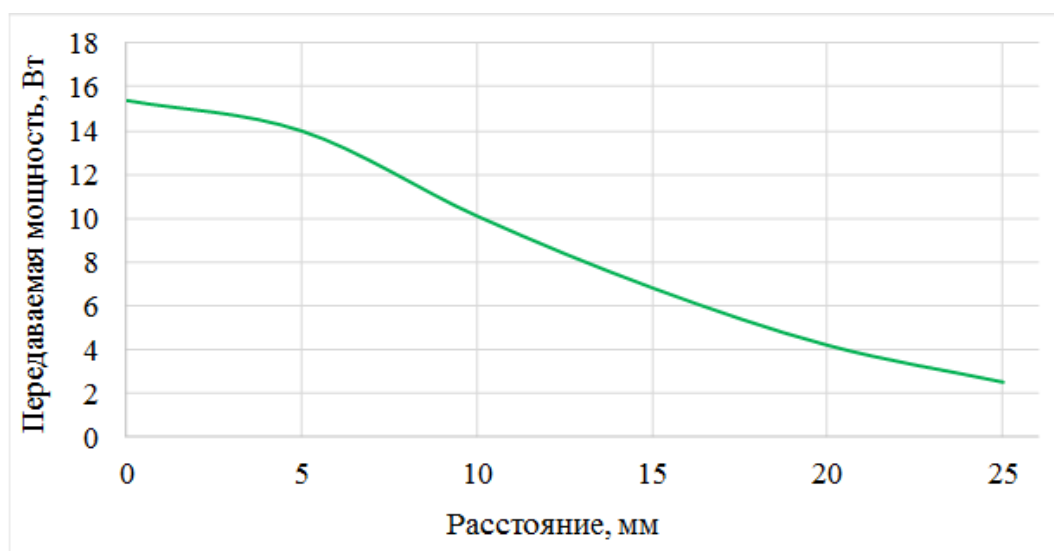


Рис. 6. Зависимость максимальной передаваемой мощности системы от расстояния передачи энергии

Fig. 6. Dependence of system maximum transferred power on the distance of power transfer

При увеличении расстояния между катушками снижается величина взаимной индукции, и, как следствие, снижается передаваемая мощность. Кривая имеет нисходящий характер, наибольшее значение передаваемой мощности 15,41 Вт достигается при минимальном воздушном зазоре между приемной и передающей частями системы. При рас-

стоянии 25 мм передаваемая мощность уменьшается примерно в 6,2 раз и составляет 2,5 Вт.

На рис. 7 приведена зависимость эффективности работы двунаправленной БСПЭ от расстояния между приемной и передающей катушками при максимальной передаваемой мощности.

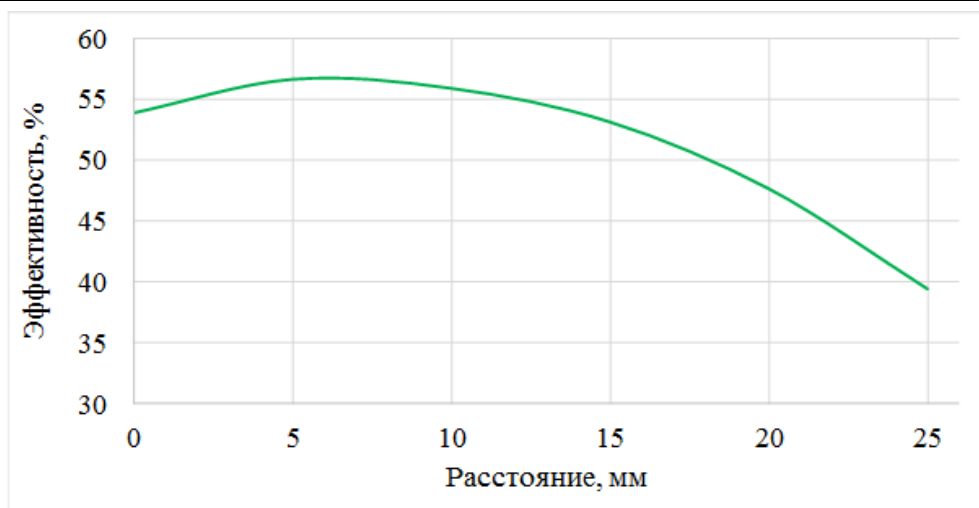


Рис. 7. Зависимость эффективности системы от расстояния передачи энергии при максимальной передаваемой мощности

Fig. 7. System efficiency dependence on the distance of power transfer at the maximum transferred power

Из кривой на рис. 7 следует, что максимальное значение эффективности при максимальной передаваемой мощности достигает 56,68% при расстоянии между приемной и передающей катушками 5 мм. Это обусловлено лучшей по сравнению с другими случаями согласованностью сопротивления нагрузки с БСПЭ при данной передаваемой мощности и расстоянии.

Представленный в данной работе прототип системы имеет максимальную выходную мощность менее 20 Вт, а эффективность около 60%. В системах беспроводной передачи энергии, как можно увидеть по данным из таблицы 1, с увеличением мощности растет эффективность ее работы. Это обусловлено тем, что потери энергии в компонентах и резонансных контурах растут в значительно меньшей степени, чем передаваемая мощность системы. Это подтверждается ранее проведенными испытаниями однонаправленной систе-

мы, основанной на схожих схемотехнических решениях [25, 29]. Мощность нагрузки была ограничена вторичным источником питания передающей части системы и составила 133,45 Вт, а максимальный уровень эффективности составил 76,47%. Стоит отметить, что данные параметры были достигнуты на прототипе системы, в котором выполнено экранирование магнитных полей, что значительно снижает параметры эффективности и передаваемой мощности. Во многих исследовательских работах приводятся данные эффективности и передаваемой мощности при работе системы без экранирования.

Можно заметить, что эффективность разработанного прототипа системы сопоставима с рассмотренными решениями. Например, системы стандарта Qi и PMA – однонаправленные, при этом имеют эффективность в диапазоне 60-70% [32], а стандарта A4WP – эффективность порядка 55%.

Таблица 1. Характеристики двунаправленных БСПЭ**Table 1.** Characteristics of bidirectional wireless power transfer systems

Эффективность, % / Efficiency, %	Передаваемая мощность, Вт / Transmitted power, W	Частота, кГц / Frequency, kHz	Расстояние между частями системы, мм / Distance between parts of the system, mm	
58,6	1,55	678	—	[20]
70	2,5	90-205	2	[19]
60	2,7	—	—	[30]
62,5	2,7	6780	23	[31]
85	1000	20	55	[18]
92	1200	—	—	[15]
85	1500	20	40	[16]
91	3300	85	120	[17]

Увеличение выходной мощности системы потребует заменить повышающий DC-DC преобразователь на соответствующий требуемым параметрам. Также потребуется выбрать соответствующие транзисторы и другие пассивные компоненты. Увеличение мощности системы потребует расчета и применения других приемного и передающего контуров. Однако при этом структура и базовые схемотехнические решения, предложенные в данной работе, останутся без изменений.

Выводы

В работе представлена структура и принципиальная электрическая схема двунаправленной БСПЭ на основе автогенератора с параллельным резонансным контуром. Описан принцип работы разработанного схемотехнического решения в режиме приема и передачи энергии, а также приведены результаты

экспериментальной проверки предложенной системы. Наибольшее значение передаваемой мощности 15,4 Вт достигается при установленных практически вплотную приемной и передающей частей системы, при этом наибольшую величину эффективности 59,91% БСПЭ можно получить при передаваемой мощности 10,09 Вт. Также были построены графические зависимости эффективности системы и передаваемой мощности от расстояния между приемной и передающей частями БСПЭ по данным, полученным с помощью экспериментальных образцов. Увеличение расстояния между частями системы снижает передаваемую мощность, при расстоянии 25 мм передаваемая мощность составляет 2,5 Вт.

Преимуществами разработанной двунаправленной БСПЭ перед аналогами является интегрированная система управления режимом передачи энергии и

силовая часть системы, не требующая специализированной системы управления, так как выполнена в виде резонансного автогенератора. Представленную в данной работе систему возможно использовать для перераспределения энергетических ресурсов между автономными агентами робототехнических систем, источниками питания которых являются аккумуляторные батареи с одинаковым или

разным номинальным напряжением.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку алгоритмов позиционирования робототехнических систем для двунаправленной беспроводной системы передачи энергии с учетом ограничений разработанной системы.

Список литературы

1. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов // Информатика и автоматизация. 2018. Т. 5. № 60. С. 39-63. <https://doi.org/10.15622/sp.60.2>.
2. Multi-robot path planning for a swarm of robots that can both fly and drive / Araki B., Strang J., Pohorecky S., Qiu C., Naegeli T., Rus D. // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2017. P. 5575-5582. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989657>.
3. Задачи группового управления роботами в робототехническом комплексе пожаротушения / А.В. Архипкин, В.И. Комченков, Д.Н. Корольков, В.Ф. Петров, С.Б. Симонов, А.И. Терентьев // Труды СПИИРАН. 2016. Т. 2. № 45. С. 116-129. <https://doi.org/10.15622/sp.45.7>.
4. Khaluf Y., Vanhee S., Simoens P. Local ant system for allocating robot swarms to time-constrained tasks // Journal of Computational Science. 2019. Т. 31. С. 33-44. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2018.12.012>.
5. Krestovnikov K., Cherskikh E., Ronzhin A. Mathematical model of a swarm robotic system with wireless bi-directional energy transfer // Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms. Springer, Cham, 2020. С. 13-23. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37841-7_2.
6. Melhuish C., Kubo M. Collective energy distribution: Maintaining the energy balance in distributed autonomous robots using trophallaxis // Distributed Autonomous Robotic Systems 6. Springer, Tokyo, 2007. P. 275-284. https://doi.org/10.1007/978-4-431-35873-2_27.
7. Wireless power systems for mobile devices supporting inductive and resonant operating modes / P.S. Riehl, A. Satyamoorthy, H. Akram, Y.-C. Yen, J.-C. Yang, B. Juan, C. Lee, F. Lin, V. Muratov, W. Plumb, P.F. Tustin // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2015. Т. 63. №. 3. С. 780-790. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2398413>.

8. Miśkiewicz R., Moradewicz A. Contactless power interface for plug-in electric vehicles in V2G systems // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. 2011. T. 59. №. 4. C. 561-568.
9. Deyle T., Reynolds M. Surface based wireless power transmission and bidirectional communication for autonomous robot swarms // 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2008. C. 1036-1041. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543341>.
10. Design and test of a high-power high-efficiency loosely coupled planar wireless power transfer system / Z.N. Low, R.A. Chinga, R. Tseng, J. Lin // IEEE transactions on industrial electronics. 2008. T. 56. №. 5. C. 1801-1812. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2010110>.
11. Itoh J.-I., Noguchi K., Orikawa K. System design of electric assisted bicycle using EDLCs and wireless charger // 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE ASIA). IEEE, 2014. C. 2277-2284. <https://doi.org/10.1109/IPEC.2014.6869907>.
12. Shaw T., Mitra D. Wireless power transfer system based on magnetic dipole coupling with high permittivity metamaterials // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2019. T. 18. №. 9. C. 1823-1827. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2930769>.
13. Two-dimensional inductive power transfer system for mobile robots using evenly displaced multiple pickups / C. Park, S. Lee, G.H. Cho, S.Y. Choi, C.T. Rim // IEEE Transactions on Industry Applications. 2013. T. 50. №. 1. C. 558-565. <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2271604>.
14. Perpetual robot swarm: long-term autonomy of mobile robots using on-the-fly inductive charging / F. Arvin, S. Watson, A.E. Turgut, J. Espinosa, T. Krajník, B. Lennox // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2018. T. 92. №. 3. C. 395-412. <https://doi.org/10.1007/s10846-017-0673-8>.
15. Samanta S., Rathore A.K., Thrimawithana D.J. Bidirectional current-fed half-bridge (C)(LC)–(LC) configuration for inductive wireless power transfer system // IEEE Transactions on Industry Applications. 2017. T. 53. №. 4. C. 4053-4062. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2682793>.
16. Madawala U.K., Thrimawithana D.J. A bidirectional inductive power interface for electric vehicles in V2G systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2011. T. 58. №. 10. C. 4789-4796. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2114312>.
17. Zhao L., Thrimawithana D.J., Madawala U.K. Hybrid bidirectional wireless EV charging system tolerant to pad misalignment // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017. T. 64. №. 9. C. 7079-7086. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2686301>.
18. Madawala U.K., Neath M., Thrimawithana D.J. A power–frequency controller for bidirectional inductive power transfer systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2011. T. 60. №. 1. C. 310-317. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2174537>.

19. Miura S., Nishijima K., Nabeshima T. Bi-directional wireless charging between portable devices // 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). IEEE, 2013. С. 775-778. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2013.6749857>.
20. Huang M., Lu Y., Martins R.P. A reconfigurable bidirectional wireless power transceiver for battery-to-battery wireless charging // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2018. Т. 34. №. 8. С. 7745-7753. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2881285>.
21. Wu H., Gu B., Wang X., Pickert V., Ji B. Design and control of a bidirectional wireless charging system using GaN devices // 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE, 2019. P. 864-869. <https://doi.org/10.1109/APEC.2019.8721909>.
22. Neath M.J., Swain A.K., Madawala U.K., Thrimawithana D.J., Vilathgamuwa D.M. Controller synthesis of a bidirectional inductive power interface for electric vehicles // 2012 IEEE Third International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET). IEEE, 2012. С. 60-65. <https://doi.org/10.1109/ICSET.2012.6357376>.
23. Thrimawithana D.J., Madawala U. K. A contactless bi-directional power interface for plug-in hybrid vehicles // 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. IEEE, 2009. С. 396-401. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289820>.
24. Черских Е.О., Ерашов А.А., Быков А.Н. Анализ и классификация автономных робототехнических систем по параметру энергопотребления // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2021. №. 2. С. 56-80. <https://doi.org/10.17308/sait.2021.2/3505>.
25. Krestovnikov K., Cherskikh E., Smirnov P. Wireless Power Transmission System Based on Coreless Coils for Resource Reallocation Within Robot Group // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham, 2019. С. 193-203. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26118-4_19.
26. Krestovnikov K., Cherskikh E., Pavliuk N. Concept of a synchronous rectifier for wireless power transfer system // IEEE EUROCON 2019-18th International Conference on Smart Technologies. IEEE, 2019. С. 1-5. <https://doi.org/10.1109/EUROCON.2019.8861856>.
27. Krestovnikov K., Cherskikh E., Bykov A. Approach to Choose of Optimal Number of Turns in Planar Spiral Coils for Systems of Wireless Power Transmission // Elektronika ir Elektrotechnika. 2020. Т. 26. №. 6. С. 17-24. <https://doi.org/10.5755/j01.eie.26.6.26181>.
28. Meinke H., Gundlach F.W. Taschenbuch der Hochfrequenztechnik. Springer: Verlag, 1986. part B13-B15. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-96894-5>.
29. Крестовников К.Д., Быков А.Н., Ерашов А.А. Структура и схемотехническое решение системы беспроводной передачи энергии для применения в мобильных РТК // Робототехника и техническая кибернетика. 2021. Т. 9. №3. С. 196-206. <https://doi.org/10.31776/RTCJ.9305>.
30. Lu Y., Mao F., Martins R.P. Bi-directional Battery-to-Battery Wireless Charging Enabled by Reconfigurable Wireless Power Transceivers // 2018 IEEE International Confer-

31. Mao F., Lu Y., Seng-Pan U., Martins R.P. A reconfigurable cross-connected wireless-power transceiver for bidirectional device-to-device charging with 78.1% total efficiency // 2018 IEEE International Solid-State Circuits Conference-(ISSCC). IEEE, 2018. C. 140-142. <https://doi.org/10.1109/ISSCC.2018.8310223>.

32. Hwang J.T., Lee D.S., Lee J.H. [et al.] 21.8 An all-in-one (Qi, PMA and A4WP) 2.5 W fully integrated wireless battery charger IC for wearable applications // 2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). IEEE, 2016. C. 378-380. <https://doi.org/10.1109/ISSCC.2016.7418065>.

References

1. Pshikhopov V.KH., Medvedev M.YU. Gruppovoe upravlenie dvizheniem mobil'nyh robotov v neopredelennoj srede s ispol'zovaniem neustojchivyh rezhimov. [Group control of the movement of mobile robots in an uncertain environment using unstable modes]. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation*. 2018; 5: 39–63. <https://doi.org/10.15622/sp.60.2> (In Russ.).

2. Araki B., Strang J., Pohorecky S., Qiu C., Naegeli T., Rus D. Multi-robot path planning for a swarm of robots that can both fly and drive. *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2017; pp. 5575-5582. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989657>.

3. Arkhipkin A., Komchenkov V., Korolkov D., Petrov V., Simonov, S., Terentev A. *Zadachi gruppovogo upravleniya robotami v robototekhnicheskom komplekse pozharotusheniya* [Problems Of Group Control Of Robots In The Robotic Complex Of Fire Extinguishing]. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*. 2016; 2(45): 116-129. <https://doi.org/10.15622/sp.45.7> (In Russ.).

4. Khaluf Y., Vanhee S., Simoens P. Local ant system for allocating robot swarms to time-constrained tasks. *Journal of Computational Science*. 2019; 31: 33-44. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2018.12.012>.

5. Krestovnikov K., Cherskikh E., Ronzhin A. Mathematical model of a swarm robotic system with wireless bi-directional energy transfer. *Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms, Studies in Systems, Decision and Control*. 2020; 272: 13-23. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37841-7_2.

6. Melhuish C., Kubo M. Collective energy distribution: Maintaining the energy balance in distributed autonomous robots using trophallaxis. *Distributed Autonomous Robotic Systems 6*. Springer, Tokyo. 2007; 275-284. https://doi.org/10.1007/978-4-431-35873-2_27.

7. Riehl P.S., Satyamoorthy A., Akram H., Yen Y.-C., Yang J.-C., Juan B., Lee C., Lin F., Muratov V., Plumb W., Tustin P.F. Wireless Power Systems for Mobile Devices Supporting

Inductive and Resonant Operating Modes. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2015; 63(3): 780-790. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2398413>.

8. Miskiewicz R., Moradewicz A. Contactless power interface for plug-in electric vehicles in V2G systems. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2011; 59(4): 561-568.

9. Deyle T., Reynolds M. Surface based wireless power transmission and bidirectional communication for autonomous robot swarms. *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2008; pp. 1036-1041. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543341>.

10. Low Z.N., Chinga R.A., Tseng R., Lin J. Design and Test of a High-Power High-Efficiency Loosely Coupled Planar Wireless Power Transfer System. *Industrial Electronics*. 2009; 56(5): 1801-1812. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2010110>.

11. Itoh J.-I., Noguchi K., Orikawa K. System design of electric assisted bicycle using EDLCs and wireless charger. *Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA)*. 2014; pp. 2277-2284. <https://doi.org/10.1109/IPEC.2014.6869907>.

12. Shaw T., Mitra D. Wireless power transfer system based on magnetic dipole coupling with high permittivity metamaterials. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2019; 18(9): 1823-1827. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2930769>.

13. Park C., Lee S., Cho G.H., Choi S.Y., Rim C.T. Two-dimensional inductive power transfer system for mobile robots using evenly displaced multiple pickups. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2013; 50(1): 558-565. <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2271604>.

14. Arvin F., Watson S., Turgut A.E., Espinosa J., Krajník T., Lennox B. Perpetual robot swarm: long-term autonomy of mobile robots using on-the-fly inductive charging. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2018; 92(3): 395-412. <https://doi.org/10.1007/s10846-017-0673-8>.

15. Samanta S., Rathore A.K., Thrimawithana D.J. Bidirectional current-fed half-bridge (C)(LC)–(LC) configuration for inductive wireless power transfer system. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017; 53(4): 4053-4062. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2682793>.

16. Madawala U.K., Thrimawithana D.J. A bidirectional inductive power interface for electric vehicles in V2G systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011; 58(10): 4789-4796. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2114312>.

17. Zhao L., Thrimawithana D.J., Madawala U.K. Hybrid bidirectional wireless EV charging system tolerant to pad misalignment. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017; 64(9): 7079-7086. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2686301>.

18. Madawala U.K., Neath M., Thrimawithana D.J. A power–frequency controller for bidirectional inductive power transfer systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011; 60(1): 310-317. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2174537>.

19. Miura S., Nishijima K., Nabeshima T. Bi-directional wireless charging between portable devices. *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. 2013, pp. 775-778. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2013.6749857>.
20. Huang M., Lu Y., Martins R.P. A reconfigurable bidirectional wireless power transceiver for battery-to-battery wireless charging. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018; 34(8): 7745-7753. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2881285>.
21. Wu H., Gu B., Wang X., Pickert V., Ji B. Design and control of a bidirectional wireless charging system using GaN devices. *2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2019, pp. 864-869. <https://doi.org/10.1109/APEC.2019.8721909>.
22. Neath M.J., Swain A.K., Madawala U.K., Thrimawithana D.J., Vilathgamuwa D.M. Controller synthesis of a bidirectional inductive power interface for electric vehicles. *IEEE Third International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)*. 2012, pp. 60-65. <https://doi.org/10.1109/ICSET.2012.6357376>.
23. Thrimawithana D.J., Madawala U. K. A contactless bi-directional power interface for plug-in hybrid vehicles. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 2009, pp. 396-401. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289820>.
24. Cherskikh E. O., Erashov A. A., Bykov A. N. Analiz i klassifikacija avtonomnyh robototekhnicheskikh sistem po parametru jenergopotreblenija. [Analysis and classification of autonomous robotic systems by their energy consumption]. *Vestnik VGU. Serija: Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii = Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. 2021; 2: 56-80. <https://doi.org/10.17308/sait.2021.2/3505> (In Russ.).
25. Krestovnikov K., Cherskikh E., Smirnov P. Wireless Power Transmission System Based on Coreless Coils for Resource Reallocation Within Robot Group. *In International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. 2019, pp. 193-203. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26118-4_19.
26. Krestovnikov K., Cherskikh E., Pavliuk N. Concept of a synchronous rectifier for wireless power transfer system. *IEEE EUROCON 2019-18th International Conference on Smart Technologies*. 2019, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/EUROCON.2019.8861856>.
27. Krestovnikov K., Cherskikh E., Bykov A. Approach to Choose of Optimal Number of Turns in Planar Spiral Coils for Systems of Wireless Power Transmission. *Elektronika ir Elektrotehnika*. 2020; 26(6): 17-24. <https://doi.org/10.5755/j01.eie.26.6.26181>.
28. Meinke H., Gundlach F.W. *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*. Springer, Verlag Publ., 1986. part B13-B15. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-96894-5>.
29. Krestovnikov K., Bykov A., Erashov A. Struktura i shemotekhnicheskoe reshenie sistemy besprovodnoj peredachi jenergii dlja primenenija v mobil'nyh RTK [Structure and circuit solution of a wireless power transfer system for application in mobile robotic systems]. *Robototekhnika i tekhnicheskaja kibernetika = Robotics and Technical Cybernetics*. 2021; 9(3): 196-206. <https://doi.org/10.31776/RTCJ.9305>.

30. Lu Y., Mao F., Martins R.P. Bi-directional Battery-to-Battery Wireless Charging Enabled by Reconfigurable Wireless Power Transceivers. *In 2018 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuits (EDSSC)*. 2018; pp. 1-2. <https://doi.org/10.1109/EDSSC.2018.8487127>.

31. Mao F., Lu Y., Seng-Pan U., Martins R.P. A reconfigurable cross-connected wireless-power transceiver for bidirectional device-to-device charging with 78.1% total efficiency. *In 2018 IEEE International Solid-State Circuits Conference-(ISSCC)*, 2018; pp. 140-142. <https://doi.org/10.1109/ISSCC.2018.8310223>.

32. Hwang J.T., Lee D.S., Lee J.H. et al. 21.8 An all-in-one (Qi, PMA and A4WP) 2.5 W fully integrated wireless battery charger IC for wearable applications. *In 2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*. 2016; pp. 378-380. <https://doi.org/10.1109/ISSCC.2016.7418065>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Крестовников Константин Дмитриевич, младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: k.krestovnikov@ias.spb.su, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6303-0344>

Konstantin D. Krestovnikov, Junior Researcher of Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: k.krestovnikov@ias.spb.su, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6303-0344>

Семенов Александр Валерьевич, магистр, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: azarov211@gmail.com

Aleksandr V. Semenov, Master Student, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: azarov211@gmail.com

Ерашов Алексей Алексеевич, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социокберфизических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: erashov.a@ias.spb.su, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8003-3643>

Aleksei A. Erashov, Junior Researcher of Laboratory of Big Data Technologies in Socio-Cyberphysical Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: erashov.a@ias.spb.su, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8003-3643>

Когнитивное моделирование развития социальной напряженности в сети Интернет

А. Б. Клименко ¹✉, Я. С. Коровин ¹, И. Б. Сафроненкова ²

¹ Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем им. академика А.В. Каляева Южного федерального университета, ул. Чехова, д. 2, г. Таганрог 347928, Российская Федерация

² Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук пр. Чехова, д. 41, г. Ростов-на-Дону 344006, Российская Федерация

✉ e-mail: anna_klimenko@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данного исследования является выявление базовых признаков социальной напряженности в сети Интернет с целью автоматического выявления очагов ее распространения, на основе результатов когнитивного моделирования и онтологического анализа.

Методы. До недавнего времени методы выявления социальной напряженности в обществе сводились к анализу результатов анкетирования. Однако сдвиг многих коммуникативных процессов в информационное пространство ставит вопросы о выявлении новых признаков социальной напряженности, характерных именно для виртуальной среды, а также о выявлении базовых признаков, реализуемых в цифровой среде, которые могли бы быть обнаружены в автоматическом режиме. В данной статье путем анализа доступных в открытых источниках публикаций, относящихся к оффлайн-методам детекции социальной напряженности, анализа специфики интернет-пространства, сформирован набор признаков социальной напряженности, характерный для интернет-среды. На основе сформированного набора признаков разработаны онтология признаков социальной напряженности в сети Интернет, а также когнитивная карта развития ситуации в цифровой среде и когнитивная карта признаков социальной напряженности в Интернете. Для выявления базовых стадий социальной напряженности и базовых признаков использовалось импульсное моделирование.

Результаты. Основными результатами данной работы являются: комплекс признаков социальной напряженности в цифровой среде сети Интернет, а также выявленный комплекс базовых признаков социальной напряженности, характерный для начальных этапов развития ситуации, что обосновано результатами импульсного моделирования.

Заключение. Проведенное импульсное моделирование позволяет сделать вывод о том, что невербальные выражения негативных эмоций прослеживаются в подавляющем большинстве активных действий в рамках развития ситуации социальной напряженности в сети Интернет. Следовательно, анализ данных в первую очередь должен фиксировать очаги информации, которой сопутствуют выявленные признаки, что позволит выявлять источники социальной напряженности в Интернете на ранней стадии развития.

Ключевые слова: источники социальной напряженности в Интернет, когнитивное моделирование, импульсное моделирование, развитие ситуации.

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

Финансирование: Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 20-04-60485, № 18-29-22093.

Для цитирования: Клименко А. Б., Коровин Я. С., Сафроненкова И. Б. Когнитивное моделирование развития социальной напряженности в сети Интернет // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 104-121. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-104-121>.

Поступила в редакцию 06.10.2021

Подписана в печать 29.10.2021

Опубликована 20.12.2021

Cognitive Modeling of the Development of Social Tension on the Internet

Anna B. Klimenko ¹ ✉, Iakov S. Korovin ¹, Irina B. Safronenkova ²

¹ Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems of Southern Federal University
2 Chekhov str. Taganrog 347928, Russian Federation

² Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of The Russian Academy of Sciences
41 Chekhov ave., Rostov-on-Don 344006, Russian Federation

✉ e-mail: anna_klimenko@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of this study is to identify the basic signs of social tension on the Internet in order to automatically identify the centres of its distribution, based on the results of cognitive modeling and ontological analysis.

Methods. Until recently, methods for detecting social tension in society were reduced to the analysis of the results of surveys. However, the shift of many communicative processes into the information space raises questions about the identification of new signs of social tension typical for the virtual environment, as well as about the identification of basic signs in the digital environment that could be detected automatically. In this article, by analyzing publications available in open sources related to offline methods of detecting social tension, analyzing the specifics of the Internet, a set of signs of social tension typical for the Internet environment is formed. On the basis of the formed set of signs, an ontology of signs of social tension on the Internet was formed, as well as a cognitive map of the development of the situation in the digital environment and a cognitive map of signs of social tension on the Internet. Impulse modeling was used to identify the basic stages of social tension and its basic signs.

Results. The main result of this work is a set of signs of social tension in the digital environment of the Internet, as well as the identified set of basic signs of social tension typical for the initial stages of the development of the situation, which is proved by the results of impulse modeling.

Conclusion. The conducted impulse modeling allows us to conclude that nonverbal expressions of negative emotions can be traced in the vast majority of active actions within the development of a situation of social tension on the Internet. Therefore, data analysis should first of all register the centres of information that accompany the identified signs, which will allow identifying sources of social tension on the Internet at an early stage of development.

Keywords: sources of social tension on the Internet, cognitive modeling, impulse modeling, situation development.

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

Funding: The research was carried out with the support of the Russian Foundation for Fundamental Research: № 20-04-60485, № 18-29-22093.

For citation: Borisovna K. A., Korovin I. S., Safronenkova I. B. Cognitive Modeling of the Development of Social Tension on the Internet. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 104-121 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-104-121>.

Received 06.10.2021

Accepted 29.10.2021

Published 20.12.2021

Введение

Обнаружение в сети источников, провоцирующих усиление социальной напряженности является актуальной задачей современности. Это связано с тем, что коммуникационные процессы интенсивно перемещаются Интернет-пространство, которое, в силу реализации свойств физической непредставленности и анонимности [1], стало исключительно питательной средой для распространения слухов, разного рода фейковой информации, призывов и материалов экстремистской направленности. Помимо этого, сеть Интернет предоставляет возможность создания множества ложных аккаунтов и регистрацию на многих публикационных площадках. Это крайне затрудняет выработку адекватных стратегий и методов информационного противодействия, включая детекцию источников, провоцирующих усиление социальной напряженности на ранних этапах.

Интернет обладает еще одной важной особенностью: большими объемами циркулирующих данных. Это ведет к низкой эффективности анализа данных в условиях ограничений по времени, а также к неопределенности сроков обнаружения искомым данным.

Актуальность проблемы обнаружения очагов социальной напряженности в сети Интернет обостряется еще и тем, что к настоящему времени не сформировано общей методологией для выявления социальной напряженности в се-

ти Интернет. Перенос коммуникативных процессов в сеть – явление относительно новое, и потому, несмотря на существование отдельно разработанных методов [2-5], по-прежнему не проведены работы по проведению аналогий между оффлайн-пространством и пространством сети, между проявлениями социальной напряженности оффлайн (что ранее фиксировалось путем анализа собранных анкет) и таковыми в сети¹. Последнее могло бы служить обоснованием ряда признаков, на которые бы следовало обращать внимание в первую очередь в рамках развития ситуации напряженности.

Целью данного исследования является выявление базовых признаков социальной напряженности в сети Интернет с целью автоматического выявления очагов ее распространения, на основе результатов когнитивного моделирования и онтологического анализа.

Материалы и методы

Социальная напряженность

Социальная напряженность (Social tension) является психологическим, социальным феноменом и имеет достаточно широкий круг трактовок.

Социальная напряженность определяется как состояние социальной системы, содержание которой составляет

¹ Social tension detection on social media textual data: a literature review / Syafidah Jamil, Nurul & Siti, Jamil & Kamaruddin, Siti & Ahmad, Farzana Kabir & Angeli, Ahmad. 2020.

процесс возникновения и развития противоречивости отношений, интересов, действий людей, социальных групп, институтов и общества в целом [6].

Также существует иная точка зрения, в рамках которой социальная напряженность отображается в сознании индивидов как объективные характеристики действительности. Социальная напряженность фиксируется в отрицательных устойчивых и динамичных эмоциях, чувствах, ощущениях и представлениях, выступая функцией отражения [7].

Таким образом, в отечественной социологии социальная напряженность рассматривается как одна из наиболее существенных характеристик внутригрупповых и межгрупповых отношений.

В рамках зарубежных подходов к исследованию социальной напряженности следует выделить работы [8-13]. В перечисленных работах в основу причин возникновения социальной напряженности положена этническая гетерогенность, равно как и экономическая сегрегация групп населения.

Работа [14] содержит ряд теоретических положений, которые могут быть использованы в качестве детекции ранних признаков социальной напряженности в обществе. Внимание уделено внутригрупповому и межгрупповому взаимодействию, и получены следующие теоретические выводы:

Межгрупповая социальная напряженность возникает чаще и легче, чем внутригрупповая.

Уменьшение численности многочисленной группы индивидов наряду с увеличением численности группы малочисленной ведет к уменьшению социальной напряженности в группе большего размера и к увеличению социальной напряженности в группе меньшего размера.

Сегрегация групп приводит к уменьшению социальной напряженности внутри групп.

Сегрегация усиливает межгрупповую социальную напряженность.

Увеличение социальной мобильности ведет к усилению социальной напряженности внутри классов и к уменьшению социальной напряженности между классами.

Под социальной неудовлетворенностью понимается такое состояние социальной системы, которое описывается увеличением ее нестабильности в силу нарушения прав индивидов [15].

В других работах термин "социальная неудовлетворенность" заменяется термином "социальная поляризация", и, в свою очередь, степень социальной поляризации может быть оценена формально [16-24]. Оценки получают путем опросов индивидов контрольных выборок.

В настоящее время типовой методикой определения степени развития социальной напряженности являются, помимо наблюдения за объективной действительностью, опросы населения [25,26] с последующим моделированием.

Однако такой подход, во-первых, занимает немалое время, начиная от сбора данных от экспертов и заканчивая

моделированием, в то время как формирование и развитие социальной напряженности – процесс динамический. Во-вторых, зачастую ответы экспертов не являются откровенными, а выборка опрашиваемых может быть нерепрезентативной и, в-третьих, такие способы оценивания не принимают во внимание тех расширенных возможностей анонимного общения, которое предоставляется всемирной сетью Интернет.

Поэтому актуальной становится задача автоматической детекции развития социальной напряженности и ее источников в информационном пространстве, на основе классических методов детекции уровней социальной напряженности, но с учетом специфики цифровой среды.

Формирование признаков социальной напряженности для цифрового пространства сети Интернет

При формировании обобщенного набора маркеров детекции социальной напряженности в сети Интернет необходимо учитывать, что признаки социальной напряженности трансформируются в состояние отдельно взятого индивида, которое впоследствии находит отражение в сети Интернет в виде постов вполне определенного содержания. Поэтому будем рассматривать перечисленные признаки социальной напряженности относительно их возможного выражения в социальных сетях.

1. Агрессия.

Состояние агрессии индивида находит отражение в сети следующим образом:

- в виде постов, содержащих ключевые слова- маркеры агрессии;
- реализуются посредством кибербуллинга;
- в виде изображений и видео, содержащих изображение индивида с невербальными признаками агрессии.

2. Депрессия.

Депрессивные настроения отображаются аналогичным образом:

- посты, графика, видео, в которых присутствуют маркеры депрессивных состояний. Также депрессивные состояния характерны для жертв буллинга.

3. Гнев.

Выявляется посредством анализа постов на предмет ключевых слов, а также путем фиксации невербальных признаков гнева.

4. Усталость.

Выявляется аналогично предыдущему признаку: на основе выявления невербальных маркеров усталости в текстах и изображениях индивида.

Перечисленные выше признаки относятся к эмоциональной сфере индивидов и должны использоваться в совокупности с косвенными признаками, относящимися к окружению индивида в сетевом пространстве.

5. Наличие тесно связанных групп населения со слабым внешним взаимодействием.

Наличие таких групп в сетевом пространстве прежде всего означает наличие группы индивидов, сплоченных на основе какой-либо идеи, либо занятия. Поэтому при детекции соци-

альной напряженности в сети целесообразна фиксация групп, особенно сильно связанных (что можно определить по частоте репостов, по скорости распространения мнений и по агрессивному настроению относительно индивидов, не являющихся членами группы).

6. Резкий рост какой-либо социальной группы и уменьшение размеров другой.

Данный признак, аналогично предыдущему, в большей степени относится к оффлайн-формируемым социальным группам, однако точно так же может служить косвенным признаком создания группы в сети Интернет, которая занимается активным рекрутингом новых участников.

7. Недовольство чем-то.

Выражается в текстах, графике, видео и эмоционально сводится к признакам 1-4. Кроме того, выражение недовольства своим материальным состоянием, правительством и т.п. отражается путем создания соответствующих постов и репостов.

8. Наличие протестных настроений/Формирование образа врага/протестные призывы.

Перечисленное выявляется путем анализа текстового контента с использованием словарей. Так же, как было упомянуто выше, имеют значения СТА (Calls to Action).

9. Циркуляция в социальных группах слухов, как правило, не соответствующих действительности и способствующих росту социальной напряженности.

Соотнесем перечисленные выше маркеры социальной напряженности с маркерами, позволяющими идентифицировать индивида – источника усиления социальной напряженности в цифровой среде.

1. Эмоциональные маркеры (агрессия, депрессия, гнев, усталость) выявляются в текстах, изображениях и видео путем фиксации невербальных маркеров и путем определения тональностей текстов.

2. Признак наличия тесно связанных групп относительно одного индивида выражается ограниченным кругом общения в социальных сетях, регулярными репостами информации ограниченного круга сообществ, регулярным посещением одних и тех же сайтов (профилей, форумов, и т.д.)

3. Признак наличия резкого роста какой-либо группы относительно индивида определяется следующим образом:

- индивид занимает активную позицию рекрутера в группу путем регулярной рассылки приглашений, возможно, с призывами к протестным действиям;

- индивид занимается активным репостингом информации, публикуемой в какой-либо группе;

- индивид вступает в растущую группу и принимает на себя роль рекрутера (лидера мнений) либо распространителя информации.

4. Недовольство любого рода выражается невербальными признаками (аг-

рессия, депрессия, гнев, усталость) в совокупности с постами характерного содержания, а также генерацией ложных слухов, призывов к активным протестам.

5. Наличие протестных настроений/Формирование образа врага/протестные призывы индивида выражается в публикации постов соответствующей тематики, а также фиксируется невербальными признаками.

6. Генерация слухов в контексте одного индивида фиксируется следующим образом:

- либо индивид сам является источником слухов, при этом используя фейк-контент и фейк-аккаунты,
- либо индивид занимается репостингом слухов.

Здесь целесообразно разделить индивидов-распространителей социальной напряженности на две группы: это лидеры мнений и последователи.

Лидеры мнений занимаются непосредственной стимуляцией напряженности каким-либо из способов и постоянно увеличивают количество последователей. Последние в большей степени занимаются репостингом авторитетных мнений и в конечном счете также увеличивают число последователей.

Таким образом, систематизируя выделенные признаки, они могут быть классифицированы следующим образом.

1. По типу выражения: 1.1. Невербальные; 1.1.1. Гнев, 1.1.2. Агрессия, 1.1.3. Депрессия, 1.1.4. Усталость. 1.2. Вербальные; 1.2.1. СТА, 1.2.2. Выражение недовольства, 1.2.3. Рекрутинг, 1.2.4. Наличие тесно связанных групп. 1.3. На ос-

нове Интернет-технологий; 1.3.1. Рекрутинг, 1.3.2. Репостинг, 1.3.3. Фейк-аккаунты, 1.3.4. Публикация слухов.

2. По типу реализации: 2.1. Текст; 2.2. Графика; 2.3. Видео.

3. По типу участия индивида: 3.1. Инициатор; 3.2. Последователь.

Невербальные признаки могут быть зафиксированы методами в зависимости от типа реализации. Например, маркер "гнев" на видео фиксируется путем детекции маркерных состояний индивида в соответствии, например, с работами Пола Экмана [27], в тексте - путем определения эмоциональной окраски сообщения. Признаки, выделенные в группу "На основе Интернет-технологий" специфичны сетевой среде и могут быть фиксированы путем методов, используемых для идентификации репостинга, рекрутинга, фейк-аккаунтов и др. Однако следует отметить, что признаки из группы 1.3, а именно признаки 1.3.1., 1.3.2., 1.3.4., 1.3.5 являются элементами публикуемого (рассылаемого контента), а потому могут идентифицироваться посредством признаков групп 1.1. и 1.2. Комплекс признаков представлен в виде онтологии признаков социальной напряженности в среде Интернет (рис.1).

Также следует отметить, что рекрутинг входит в группы 1.2. и 1.3. по той причине, что является отдельным типом контента и подразумевает вполне определенное содержание, одновременно с этим являясь реализацией возможностей Интернет-технологий.

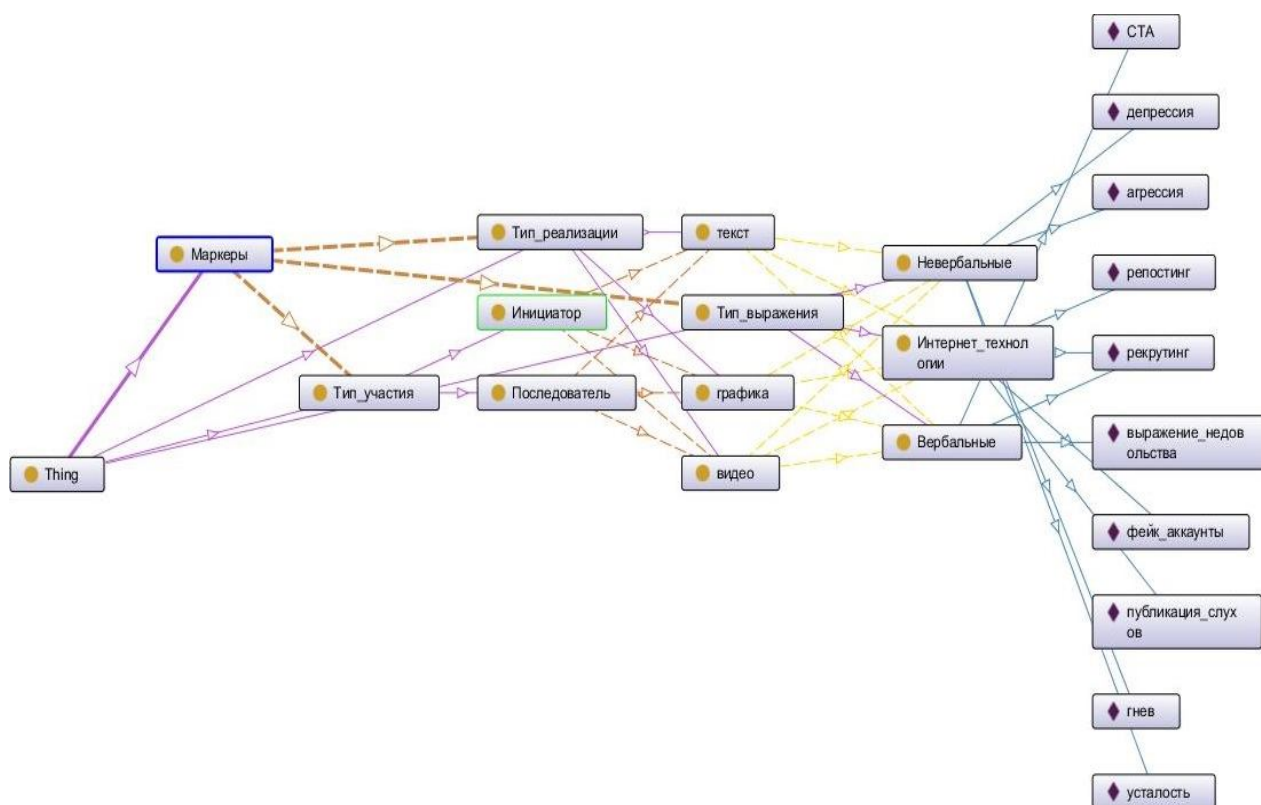


Рис. 1. Онтология признаков выражения социальной напряженности в сети Интернет

Fig. 1. Ontology of the signs of social tension on the Internet

Когнитивная модель развития ситуации

Представим процессы и группы индивидов, влияющих на уровень их интенсивности в виде концептов когнитивной карты.

1. Лидер мнения. Будем полагать, что такой лидер один и начинает формирование группы. В реальности лидеров, организующих подготовку к протестным акциям, несколько, но в рамках моделирования будем полагать, что действия, совершаемые ими, идентичны, и можем консолидировать группу лидеров, рассматривая ее как одного лидера мнений.

2. Неудовлетворенность обстановкой. Является ведущим концептом модели, поскольку оказывает формирующее воздействие на лидеров мнений (вряд ли человек, который всем доволен, начнет продуцировать напряженность). Неудовлетворенность обстановкой формирует лидеров мнений, является причиной невербального проявления невербальных признаков напряженности, является дополнительным фактором роста числа последователей (люди, которые всем довольны, редко ведутся на провокации).

3. Последователи. Это люди, которые под давлением неудовлетворенно-

сти обстановкой, реализуемого рекрутинга и репостинга мнений начинают производить репостинг, слухи и т.п.

4. Оппоненты. Это группа, которые не разделяют мнений лидеров мнений и последователей, однако, под информационным давлением в совокупности недовольности обстановкой, буллинга со стороны лидеров мнений и их последователей, репостинга мнений, слухов и СТА переходят в группу последователей (либо по крайней мере теряют способность противостоять последователям и лидерам мнений).

5. Выражение недовольства лидеров мнений и последователей продуцирует: невербальные признаки социальной напряженности (что выражается в маркерах отрицательных и деструктивных эмоций), репостинг мнений, слухи, СТА, вносит вклад в усиление недовольности обстановкой.

6. Невербальные признаки напряженности продуцируют недовольность обстановкой.

7. Репостинг – осуществляется последователями и реализует распространение информации в сетевых средах, также является проявлением выражения недовольства в сети.

8. Слухи – являются следствием выражения недовольства в сети.

9. СТА также является способом выражения недовольства

10. Буллинг – реализуется лидерами мнений и последователями по отноше-

нию к оппонентам с целью деактивировать альтернативные мнения в сети.

11. Рекрутинг – реализуется лидерами мнений и их последователями. При этом рекрутинг влияет на численность последователей.

12. Ложные аккаунты – используются при распространении слухов, рекрутинге и буллинге.

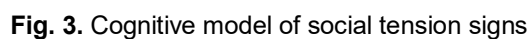
Разработанная когнитивная модель имеет следующий вид (рис. 2).

Следует отметить, что приведенная когнитивная карта процессов, характеризующих социальную напряженность, разработана для сетевой среды: в отличие от используемых в настоящее время опросников, прежде всего в модели учтены процессы, которые реализуются исключительно средствами Интернет, а именно: репостинг, буллинг, СТА, ложные аккаунты.

Когнитивная модель признаков, сопровождающих развитие ситуации социальной напряженности

Основной сложностью выявления ключевых признаков, позволяющих идентифицировать источник социальной напряженности, является тесное взаимное влияние признаков социальной напряженности в сети. Связи между признаками показаны на рис. 3.

Далее, для выявления комплекса базовых признаков, наиболее характерных для продуцирования социальной напряженности в сети Интернет, проведем сценарный анализ (импульсное моделирование).



Результаты и их обсуждение

Анализ значимости процессов, протекающих в рамках развития ситуации социальной напряженности

Проведем импульсное моделирование развития ситуации социальной напряженности на когнитивной карте процессов, сопровождающих развитие ситуации социальной напряженности.

В начале развития ситуации (рис. 4) происходит резкое значительное увеличение уровня рекрутинга, в то время как невербальные признаки напряженности, СТА и репостинг мнений остаются на одном уровне. Следует отметить, что

самым первым процессом, развивающимся в рамках развития социальной напряженности, является проявление невербальных признаков социальной напряженности. По результатам предыдущего моделирования развития ситуации, мы выделили следующие процессы, развивающиеся на начальном этапе, а именно: рекрутинг, невербальные проявления напряженности, СТА, репостинг.

Рассмотрим каждый из этих процессов с точки зрения признаков и, в том числе, признаков, которые выявляются прежде всего при перечисленных процессах (рис. 5, 6).

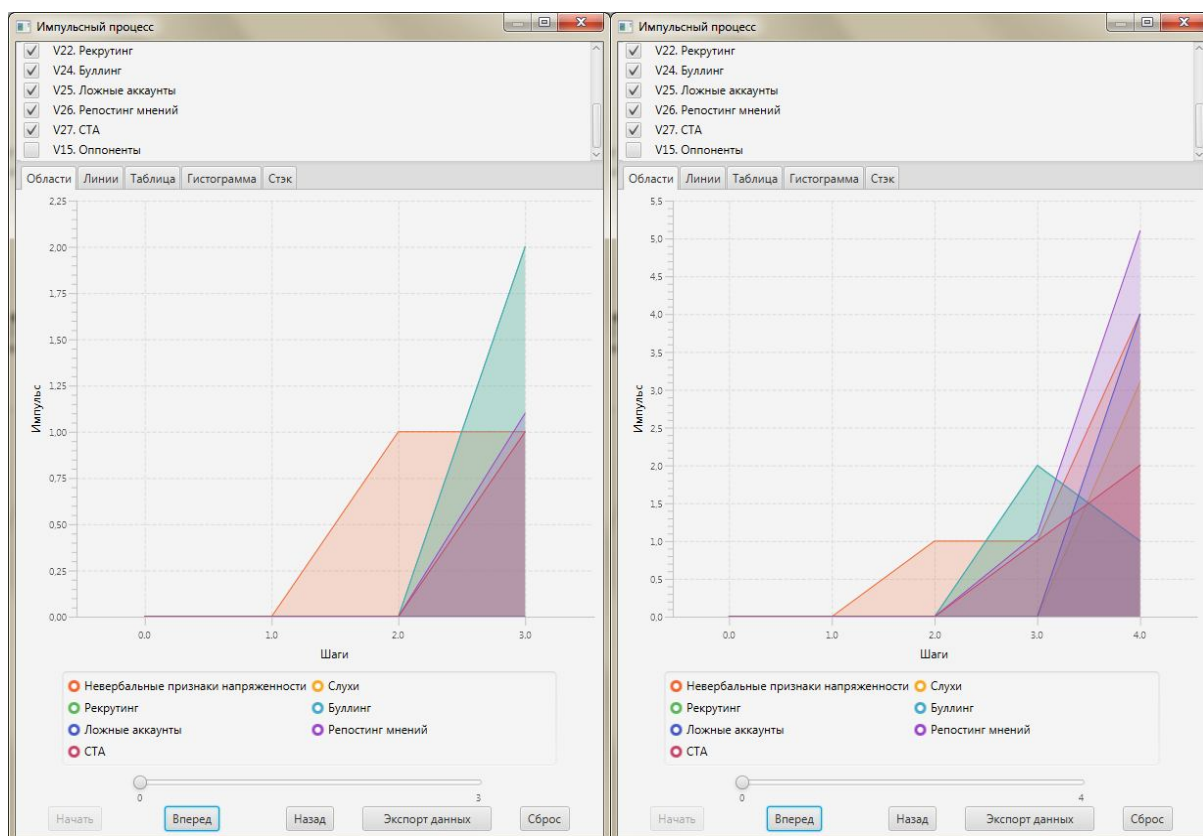


Рис. 4. Начальный этап развития ситуации в соответствии с процессом импульсного моделирования

Fig.4. The initial stage of the development of the situation in accordance with the process of impulse modeling

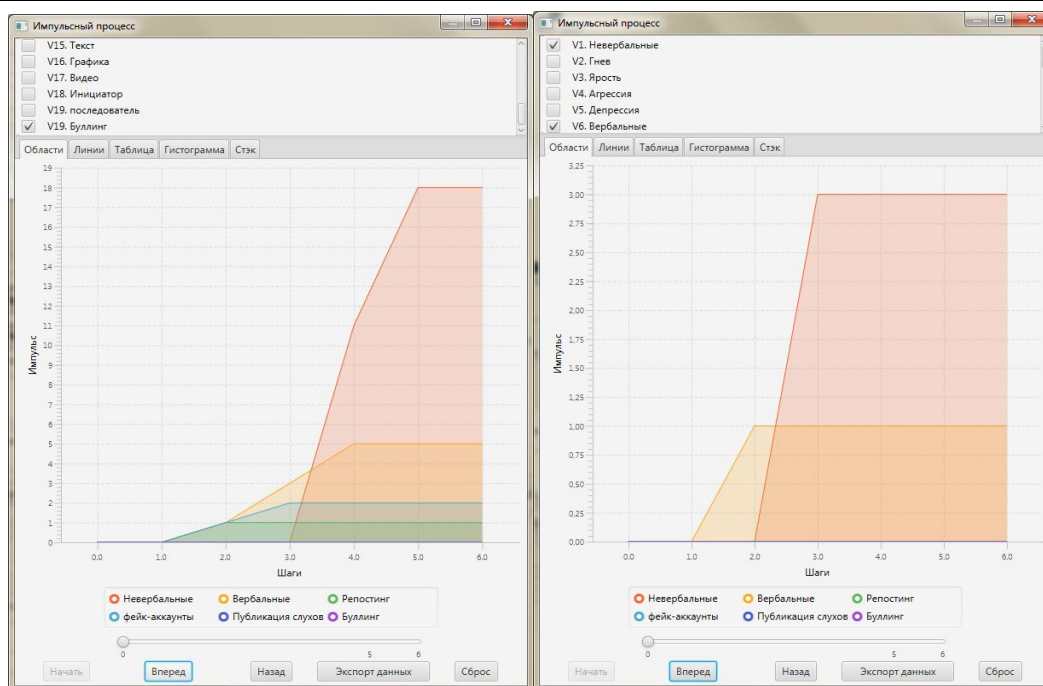


Рис. 5. Задействованные признаки СН при подаче импульса на концепт "Рекрутинг" и СТА

Fig. 5. Involved ST signs when impulsing to the concept "Recruiting" and CTA

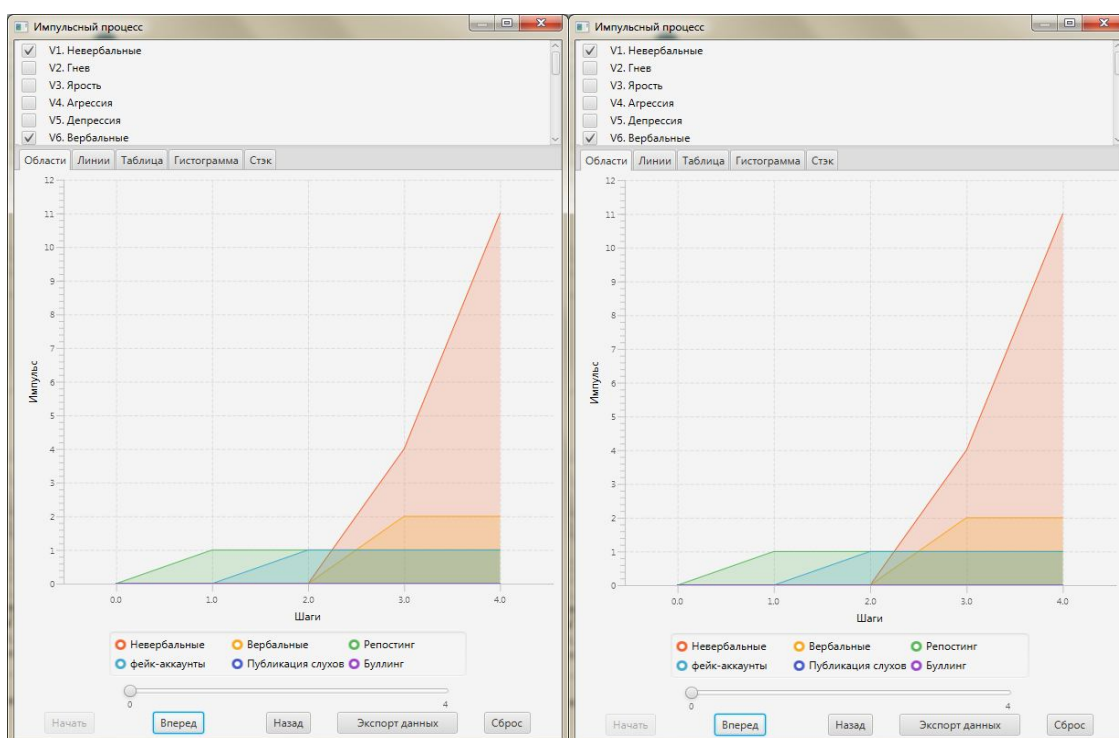


Рис. 6. Задействованные признаки при подаче импульса на концепт репостинг и последовательное воздействие на концепты "рекрутинг", "СТА", "репостинг" также при моделировании подтверждается значимость невербальных проявлений социальной напряженности

Fig. 6. The signs involved in giving an impulse to the concept of reposting and the consistent impact on the concepts of "recruiting", "CTA", "reposting" are also confirmed in modeling the significance of non-verbal manifestations of social tension

Таким образом, проведенное моделирование позволяет сделать вывод о том, что среди признаков социальной напряженности, которые реализуются в интернет-пространстве, вследствие выражения признаков друг через друга, невербальные проявления таких негативных эмоций, как гнев, ярость, депрессия сопровождают все выделенные нами процессы выражения социальной напряженности. Далее, автоматическая детекция источников социальной напряженности в цифровом пространстве сводится к детекции соответствующих психоэмоциональных состояний индивида.

Выводы

Данное исследование посвящено вопросу автоматической детекции источников стимуляции социальной напряженности в сети Интернет. Поскольку перенос коммуникативных процессов в сетевое пространство – явление относительно новое – к настоящему времени, помимо отдельно взятых методик, не было разработано комплекса признаков социальной напряженности, специфичных для цифрового простран-

ства, равно как и методов их автоматической детекции.

В рамках данной работы, опираясь на методы обнаружения социальной напряженности вне сетевого пространства, а также на результаты когнитивного моделирования, сформирован набор признаков, позволяющих произвести детекцию очагов стимулирующих социальную напряженность на ранних этапах ее развития. Разработана онтология и набор когнитивных карт, позволяющих не только установить связь процессов, сопровождающих социальную напряженность в сети и ее признаков, но и выявить базовые признаки, которые присутствуют при реализации процессов ранних этапов развития ситуации. Таким образом, можно сделать выводы о том, что фиксация в цифровом пространстве очагов с преобладанием невербального выражения негативных эмоций, сопровождающих ситуацию социальной напряженности, позволяет, собственно, выявить и сами очаги, стимулирующие социальную напряженность и, следовательно, применить известные методы информационного противодействия.

Список литературы

1. Melnik E., Korovin I., Klimenko A. A Cognitive Assistant Functional Model and Architecture for the Social Media Victim Behavior Prevention // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 985. P. 51-61.
2. Thakur P., Shrivastava D. R., D. R. A Review on Text Based Emotion Recognition System // *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 7(5), 2018. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2018/01752018> 8.

3. Analysis for Helpful Reviews Prediction / O. Oueslati, A. I. S. Khalil, H. Ounelli, H. Sentiment // International Journal. 2018. 7(3). <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2018/02732018>
4. Zhang X. & Kanbur R. What Difference Do Polarisation Measures Make? An Application to China // The Journal of Development Studies. 2001. 37(3). P. 85–98. <https://doi.org/10.1080/00220380412331321981>.
5. An Approach Towards Identification and Prevention of Riots by Analysis of Social Media Posts in Real-Time / A. Sachdeva, R. Kapoor, A. Sharma, A. Mishra // Proceedings of the 8th International Conference Confluence 2018 on Cloud Computing, Data Science and Engineering, Confluence 2018. P. 581–586. <https://doi.org/10.1109/CONFLUENCE.2018.8442714>
6. Данакин Н.С., Дятченко Л.Я., Сперанский В.И. Механизмы социальной регуляции и технологии управления конфликтом // Социально-политический журнал. 1996. №3. С.151-162.
7. Муханова М.Н. Ценностные установки и поведенческие стратегии студенческой молодежи // Модернизация социальной структуры российского общества. М.: Изд-во Ин-та социологии РАН, 2008. С. 271-265.
8. Varshney, Ashutosh, Ethnic conflict and civil society: India and beyond // World Politics. 2001. 53, 362–398.
9. Horowitz Donald, Direct, displaced and cumulative ethnic aggression // Comparative Politics. 1973. 6. P. 1–16.
10. Horowitz Donald, 2000. Ethnic Groups in Conflict, Second Edition. University of California Press, Berkeley. 1985.
11. Horowitz, Donald, 2001. The Deadly Ethnic Riot. University of California Press, Berkeley. Jha, Saumitra. 2008. Trade, institutions and religious tolerance: evidence from India, mimeo, Stanford University Justino, Patricia. 2005.
12. Lester Ashley. 2005. Essays in the theory of economic growth, PhD Thesis, MIT, Chapter 1.
13. Montalvo José, Reynal-Querol Marta, Ethnic polarization, potential conflict, and civil war // The American Economic Review. 2005. 95. P. 796–815.
14. Rohner D. Reputation, group structure and social tensions // J. Dev. Econ. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2010.10.008>
15. Pirogov I. V. Sotsialnaya napryazhennost: Teoriya, metodologiya i metody izmereniya. Dissertatsiya na soiskanie kand. sotsiologicheskikh nauk. In Russian [Social unsatisfaction: Theory, methodology and measurement methods: Dis. PhD in social sciences]. Moscow, 2002. 177.
16. Esteban J., Ray D. Conflict and Distribution // Journal of Economic Theory. 1999. 87(2). P.379–415.

17. Biancotti C. A polarization of inequality? The distribution of national Gini coefficients 1970–1996 // *Journal of Economic Inequality*. 2006. Springer, 4, 1–32.
18. Woo J. Fiscal Deficit, Fiscal Volatility and Growth: Social Polarization. *The Political Economy of Fiscal Policy* // *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. Springer, 2006. 570. P. 7–33. https://doi.org/10.1007/3-540-31417-2_2. 7.
19. Woo J. Inflation, Composition of Deficit Finance, and Social Polarization. *The Political Economy of Fiscal Policy* // *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. Springer, 2006. 570, 35–45. https://doi.org/10.1007/3-540-31417-2_3.
20. Esteban J., Gradyn C., Ray D. An Exunsatisfaction of a Measure of Polarization, with an application to the income distribution of five OECD countrie // *The Journal of Economic Inequality*. 2007. Springer, 5, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10888-006-9032-x>.
21. Esteban J., Schneider G. Polarization and Conflict: Theoretical and Empirical Issues // *Journal of Peace Research*, 2008. 45. P. 131–141. <https://doi.org/10.1177/0022343307087168>.
22. Esteban J., Ray D. (2011). Comparing Polarization Measures. *Oxford Handbook of the Economics of Peace and Conflict*. Oxford University Press. Retrieved from: <http://www.nyu.edu/econ/user/debraj/Papers/EstRayChapter.pdf>.
23. Esteban J., Ray D. Linking Conflict to Inequality and Polarization // *American Economic Review*. American Economic Association. 2011. 101(4). P. 1345–1374.
24. Esteban J., Mayoral L., Ray D. Ethnicity and Conflict: An Empirical Study // *American Economic Review*. American Economic Association. 2012. 102(4). P. 1310–1342.
25. Баранова Г.В., Фролов В.А., Кондрашин А.В. Особенности социальной напряженности в регионах России // *Социологические исследования*. 2011. № 6 (326). С. 48-55.
26. Баранова Г.В., Алехин Е.И. Формирование социальной напряженности в регионах Российской Федерации. Методика анализа и прогнозирования социальной напряженности // *Вестник ВГУ. Серия: Лингвистика и межкультурная коммуникация*. 2007. № 2-2 . С. 149-154.
27. Rich, Grant. (2013). Ekman, Paul. 10.1002/9781118339893.wbeccp187.

References

1. Melnik E., Korovin I., Klimenko A. A Cognitive Assistant Functional Model and Architecture for the Social Media Victim Behavior Prevention. *Advances in Intelligent Systems and Computin*, 2019, vol. 985, pp. 51-61.
2. Thakur P., Shrivastava D. R., D. R. A Review on Text Based Emotion Recognition System. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 2018. 7(5), <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2018/01752018> 8.

3. Oueslati O., Khalil A. I. S., Ounelli H., H. Sentiment Analysis for Helpful Reviews Prediction. *International Journal*, 7(3), 2018. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2018/02732018>
4. Zhang X. & Kanbur R. What Difference Do Polarisation Measures Make? An Application to China. *The Journal of Development Studies*, 2001no. 37(3), pp. 85–98. <https://doi.org/10.1080/00220380412331321981>.
5. Sachdeva A., Kapoor R., Sharma A., Mishra A. 2018. An Approach Towards Identification and Prevention of Riots by Analysis of Social Media Posts in Real-Time. *Proceedings of the 8th International Conference Confluence 2018 on Cloud Computing, Data Science and Engineering, Confluence*, 2018, pp. 581–586. <https://doi.org/10.1109/CONFLUENCE.2018.8442714>
6. Danakin N.S., Dyatchenko L.YA., Speranskij V.I. [Mechanisms of social regulation and conflict management technologies]. *Social'no-politicheskij zhurnal = Socio-political journal*, 1996, no.3, pp.151-162.
7. Muhanova M.N. [Values and behavioral strategies of students]. *Modernizaciya social'noj struktury rossijskogo obshchestva* [Modernization of the social structure of Russian society]. Moscow, 2008, pp. 271-265 (In Russ.).
8. Varshney, Ashutosh. Ethnic conflict and civil society: India and beyond. *World Politics*, 2001. 53, pp. 362–398.
9. Horowitz, Donald, Direct, displaced and cumulative ethnic aggression. *Comparative Politics*, 1973, 6, pp. 1–16.
10. Horowitz, Donald. *Ethnic Groups in Conflict*, Second Edition. University of California Press, Berkeley, 2000.
11. Horowitz Donald, 2001. *The Deadly Ethnic Riot*. University of California Press, Berkeley. Jha, Saumitra. (2008). Trade, institutions and religious tolerance: evidence from India”, mimeo, Stanford University Justino, Patricia. (2005).
12. Lester, Ashley. (2005). *Essays in the theory of economic growth*, PhD Thesis, MIT, Chapter 1
13. Montalvo José, Reynal-Querol, Marta,. Ethnic polarization, potential conflict, and civil wars. *The American Economic Review*, 2005, 95, pp. 796–815.
14. Rohner D., Reputation, group structure and social tensions, *J. Dev. Econ.* 2010, doi:10.1016/j.jdeveco.2010.10.008
15. Pirogov I. V. *Sotsialnaya napryazhennost: Teoriya, metodologiya i metody izmereniya*. Dissertatsiya na soiskanie kand. sotsiologicheskikh nauk. In Russian [Social unsatisfaction: Theory, methodology and measurement methods: Dis. PhD in social es]. Moscow, 2002. 177.

16. Esteban J., Ray D. Conflict and Distribution. *Journal of Economic Theory*, 1999, no. 87(2), pp. 379–415.
17. Biancotti C. A polarization of inequality? The distribution of national Gini coefficients 1970–1996. *Journal of Economic Inequality*, 2006, Springer, 4, pp. 1–32.
18. Woo J. Fiscal Deficit, Fiscal Volatility and Growth: Social Polarization. The Political Economy of Fiscal Policy. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. 2006, Springer, 570, pp. 7–33. https://doi.org/10.1007/3-540-31417-2_2. 7.
19. Woo J. Inflation, Composition of Deficit Finance, and Social Polarization. The Political Economy of Fiscal Policy. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. 2006, Springer, 570, pp. 35–45. https://doi.org/10.1007/3-540-31417-2_3.
20. Esteban J., Gradyn C., Ray D. An Exunsatisfaction of a Measure of Polarization, with an application to the income distribution of five OECD countries. *The Journal of Economic Inequality*, 2007, Springer, 5, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10888-006-9032-x>.
21. Esteban J., Schneider G. Polarization and Conflict: Theoretical and Empirical Issues. *Journal of Peace Research*, 2008, no. 45, pp. 131–141. <https://doi.org/10.1177/0022343307087168>.
22. Esteban J., Ray D. (2011). Comparing Polarization Measures. *Oxford Handbook of the Economics of Peace and Conflict*. Oxford University Press. Retrieved from: <http://www.nyu.edu/econ/user/debraj/Papers/EstRayChapter.pdf>.
23. Esteban J. & Ray D. Linking Conflict to Inequality and Polarization. *American Economic Review*. *American Economic Association*, 2011, no. 101(4), pp. 1345–1374.
24. Esteban J., Mayoral L., Ray D. Ethnicity and Conflict: An Empirical Study. *American Economic Review*. *American Economic Association*, 2012, no. 102(4), pp. 1310–1342.
25. Baranova G.V., Frolov V.A., Kondrashin A.V. [Features of social tension in the regions of Russia]. *Sociologicheskie issledovaniya = Sociological Research*, 2011, no. 6 (326), pp. 48–55.
26. Baranova G.V., Alekhin E.I. [Formation of social tension in the regions of the Russian Federation. Methods of analysis and forecasting of social tension]. *Vestnik VGU. Seriya: Lingvistika i mezhkul'turnaya kommunikaciya = Bulletin of the VSU. Series: Linguistics and Intercultural Communication*, 2007, no. 2-2, pp. 149–154.
27. Rich Grant. (2013). Ekman, Paul. 10.1002/9781118339893.wbeccp187.

Информация об авторах / Information about the Authors

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>

Klimenko A. Borisovna, 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>

Коровин Яков Сергеевич, кандидат технических наук, директор, Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем имени академика А.В. Каляева Южного федерального университета, г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: ykorovin@sfnu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5192-8835>

Iakov S. Korovin, Cand. of Sci. (Engineering), Director, Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems of Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation, e-mail: ykorovin@sfnu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5192-8835>

Сафроненкова Ирина Борисовна, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, e-mail: safronenkova050788@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9588-2194>

Irina B. Safronenkova, Junior Research Fellow, Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of THE Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation, e-mail: safronenkova050788@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9588-2194>

Разработка структуры информационной системы мониторинга данных о физической активности человека

Е. С. Абрамова ¹ ✉, А. А. Орлов ², К. В. Макаров ²

¹ Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
ул. Горького, д. 87, г. Владимир 600000, Российская Федерация

² Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
ул. Орловская, д. 23, г. Муром 602224, Российская Федерация

✉ e-mail: abramova23es@yandex.ru

Резюме

Цель исследования заключается в проектировании информационной системы с учетом сформулированных требований и критериев, основанной на использовании новых методов и модулей обработки данных с датчиков смартфона, предназначенной для мониторинга физической активности и факторов риска для здоровья человека.

Методы. Работа системы мониторинга данных о физической активности человека базируется на методах распознавания простых и сложных видов физической активности человека с помощью датчиков носимых устройств, персонализированном анализе факторов риска и их влиянии на здоровье, отличающемся постоянным мониторингом за выполняемыми видами физической активности и окружающим пространством человека, на применении технологии, позволяющей совмещать выполняемую активность с элементами игры, а также интеллектуальных напоминаниях человеку о необходимости обратить внимание на свое здоровье, которые формируются с учетом физического состояния человека и окружающих факторов риска для его здоровья.

Результаты. Приведена структура предлагаемой системы и описан функционал программного обеспечения.

Заключение. Спроектированная система поможет осуществить разработку информационной системы мониторинга данных о физической активности человека.

Ключевые слова: персонализированная информационная система; физическая активность; распознавание активности; факторы риска; методы машинного обучения.

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

Для цитирования: Абрамова Е. С., Орлов А. А., Макаров К. В. Разработка структуры информационной системы мониторинга данных о физической активности человека // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 122-133. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-122-133>.

Поступила в редакцию 11.09.2021

Подписана в печать 09.10.2021

Опубликована 20.12.2021

Development of the Structure of an Information System for Monitoring Human Physical Activity Data

Elena S. Abramova ¹ ✉, Alexey A. Orlov ², Kirill V. Makarov ²

¹ Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs
87 Gorkogo str., Vladimir 600000, Russian Federation

² Murom Institute (branch) Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs
23 Orlovkaya str., Murom 602264, Russian Federation

✉ e-mail: abramova23es@yandex.ru

Abstract

Purpose of research is to design an information system taking into account the developed requirements and criteria, based on the use of new methods and modules for processing data from smartphone sensors, designed to monitor physical activity and risk factors for human health.

Methods. The work of the system for monitoring data on human physical activity is based on methods for recognizing simple and complex types of human physical activity using sensors of wearable devices, personalized analysis of risk factors and their impact on health, characterized by constant monitoring of the types of physical activity performed and the space surrounding human, on the use of technology that allows combination of the activity performed with elements of the game, as well as smart reminders to a person about the need to pay attention to their health, which are formed taking into account the physical condition of a person and the surrounding risk factors for his health.

Results. The structure of the proposed system is provided and the functionality of the software is described.

Conclusion. The designed system will help to develop an information system for monitoring data on human physical activity.

Keywords: personalized information system; physical activity; activity recognition; risk factors; machine learning methods.

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

For citation: Abramova E. S., Orlov A. A., Makarov K. V. Development of the Structure of an Information System for Monitoring Human Physical Activity Data. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 122-133 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-122-133>.

Received 11.09.2021

Accepted 09.10.2021

Published 20.12.2021

Введение

Состояние и здоровье человека зависит от уровня физической активности человека. Зная информацию о выполняемых видах активности, ее количестве и факторах, окружающих человека, можно рекомендовать профилактику и лечение различных заболеваний.

Среди актуальных целей концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации

и национального проекта «Здравоохранение» можно выделить повышение продолжительности жизни граждан России. Таким образом, опираясь на данную цель, необходимо создать условия, которые позволят людям следить за своим здоровьем и влияющими на него факторами.

Согласно данным Федеральной службы государственной статистики заболеваемость людей, которые не занимаются физической культурой, превышает в

два раза заболеваемость людей, которые ведут активный образ жизни [1].

Для решения существующих проблем предлагается разработать структуру информационной системы мониторинга данных о физической активности человека.

Материалы и методы

В работах [2, 3] рассмотрены подходы к распознаванию простых видов активности с использованием датчиков носимых устройств. Оценив полученные результаты, можно сказать, что на сегодняшний день точность распознавания простых видов активности достаточно высока (91-93%).

Однако несмотря на высокую точность распознавания простых видов активности человека требуются большие вычислительные затраты на расчет признаков, необходимых для распознавания. Данные затраты ограничивают возможность применения распознавания активности на мобильных устройствах. Таким образом, становится актуальным проектирование, расчет и выбор информативных признаков, позволяющих увеличить значение точности распознавания видов активности человека и уменьшить вычислительные затраты [4-8].

Среди разработанных систем, позволяющих распознавать виды активности человека, стоит выделить «Fitbit» [9], «MiFit» [10], «URBAN FIT» [11]. Данные системы дают возможность распознавать от двух до восьми видов простых активностей. Однако приве-

денные системы имеют такие ограничения, как необходимость дополнительных устройств (фитнес-браслетов) для распознавания видов активности, также распознавание происходит только после продолжительного выполнения человеком вида активности (после 15 минут).

Виды сложных физических активностей и методы их распознавания представлены в работах [12-14]. Рассмотренные работы вносят большой вклад в данную область исследования, однако методы распознавания сложной активности не учитывают условия окружающей среды человека и его личные особенности. Таким образом, возникает необходимость в проектировании и разработке новых методов распознавания видов сложной физической активности человека, которые учитывают изменчивые окружающие условия и специфику жизнедеятельности человека.

Для выявления единичных факторов риска для здоровья человека существует большое количество мобильных приложений. Например, для мониторинга беговой активности человека – «Nike+RunClub» и «Runtastic», для контроля привычек – [15, 16], для определения показателей, влияющих на появление и развитие заболеваний – [17, 18]. Перечисленные технологии нацелены на определенный фактор риска для здоровья человека, наиболее часто требуют сбора, анализа и контроля показателей от самого человека или медицинского работника.

В настоящее время стали появляться работы [19-20], в которых использу-

ется инновационная технология «Exergames», позволяющая повысить мотивацию человека за счет внедрения игровых элементов при выполнении различных упражнений.

Результаты исследований показывают, что «Exergames» – это многообещающая технология для поддержания здорового образа жизни и повышения суточной физической активности у людей разных возрастных групп. Однако в существующих играх не предусмотрены индивидуальные тренировки с поправкой на уровень физической подготовки и, как правило, они являются стационарными, что не позволяет людям выполнять физические упражнения в любом месте и в любое удобное время.

Изучение материалов позволило сделать вывод о том, что существующие разработки направлены на решение одной выбранной задачи.

Таким образом, в настоящий момент времени не существует системы, одновременно позволяющей распознавать простые и сложные виды физической активности человека, выявлять и анализировать факторы риска для здоровья, мотивировать на выполнение упражнений, рассчитывать и анализировать коэффициент физической активности для определения группы активности человека, на ее основе предоставлять своевременные рекомендации и напоминания по поддержанию здорового образа жизни. В проектируемой системе будут учтены все необходимые требования.

Результаты и их обсуждение

Для мониторинга физической активности и состояния человека требуется мобильное устройство, которое содержит необходимые датчики. Программные модули сбора данных с датчиков смартфона и классификации видов физической активности получают данные с датчиков и автоматически без помощи человека определяют вид физической активности с помощью классических методов машинного обучения, например, метода опорных векторов:

$$F(x) = \text{sign}(\langle w \cdot x \rangle + b), \quad (1)$$

где $\langle \cdot \rangle$ – скалярное произведение;

w – нормальный вектор к разделяющей гиперплоскости;

b – вспомогательный параметр.

Целью классификации является определение физической активности человека для последующего анализа системой и расчета уровня активности человека. Для достижения более высокой точности и низких вычислительных затрат при решении задачи распознавания простых видов активности были спроектированы и выбраны информативные признаки методом Relief-F:

$$w_i = \sum_{j=1}^N \left[(x_i^j - nm(x^j)_i)^2 - (x_i^j - nh(x^j)_i)^2 \right], \quad (2)$$

где x_i^j – значение i -ой функции для точки x^j ;

$nm(x^j)$ – ближайшая точка данных в разных классах;

$nh(x^j)$ – ближайшая точка данных в одинаковых классах.

Для распознавания сложных видов активности определяется семантика сложной активности, которая необходима для получения вероятностных зависимостей между простыми видами активности и информацией о контексте. Лексические данные о виде простой активности позволяют определить цель и значение сложной активности, а информация о контексте позволяет уточнить класс активности:

$$\hat{y} = \arg \min_{y^{ts}} h(\hat{z}), \quad (3)$$

где \hat{y} – набор неопределенных классов сложной физической активности;

ts – тестирование,

$h(\hat{z})$ – классификационная функция;

\hat{z} – семантический вектор из пространства признаков.

Алгоритм обучения распознавания сложной неопределенной физической активности представим в виде функциональной схемы (рис. 1).

Этапы работы метода распознавания сложной неопределенной активности человека представлены на рис. 2.

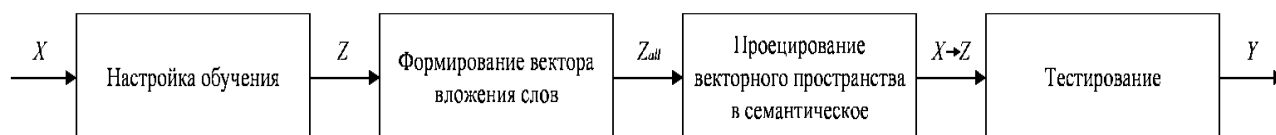


Рис. 1. Алгоритм обучения распознаванию сложной активности

Fig. 1. Learning algorithm for complex activity recognition

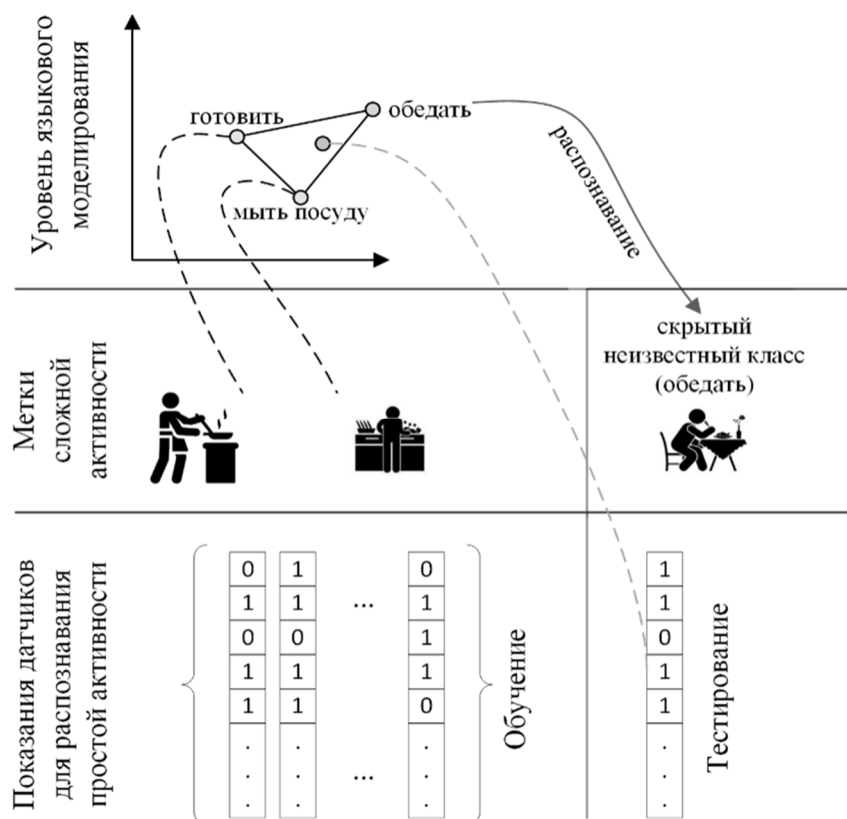


Рис. 2. Идея метода распознавания сложной неопределенной активности

Fig. 2. The idea of the method for complex undefined activity recognition

Модуль выявления и предупреждения факторов риска также анализирует полученные данные и определяет моменты возникновения и степень влияния факторов риска на здоровье человека. Установив взаимосвязи между видами активности человека и факторами риска, можно будет решать задачу предупреждения факторов риска на основе постоянного мониторинга физической активности человека.

При разработке структуры системы мониторинга данных о физической активности человека были учтены различные сценарии ее использования. Один из них связан с мониторингом данных, полученных со смартфона, закреплённого в любом удобном месте на теле человека. Программные модули мониторинга данных об активности и факторах риска и уведомления о результатах мониторинга предоставляют человеку информацию об уровне его активности и о факторах риска для здоровья.

По второму сценарию человек проходит задания, предусмотренные системой. Чтобы соревноваться с пользователями системы и открывать новые задания необходимо улучшать виртуального персонажа. Для его улучшения требуется выполнять различные физические упражнения. Физические упражнения для выполнения предлагаются с учетом физической группы человека. Таким образом, система позволит не только улучшить персонажа в игре, но и

повысить суточную физическую активность человека в реальной жизни.

Для обучения интеллектуальной системы используются данные об истории активности и состоянии человека. Выбранные данные для обучения системы способствуют персонализированному интеллектуальному анализу с учетом всех особенностей человека.

Для формирования рекомендаций по поддержанию здорового образа жизни проводится сравнение значений физиологических показателей организма человека с принятыми в медицине нормами и сведениями о субъективных ощущениях человека.

Решая задачу классификации значений в признаках факторов риска и выявляя аномальные значения, система формирует начальные рекомендации по профилактике факторов риска для здоровья человека.

Структура предлагаемой системы представлена на рис. 3.

Разработав структуру информационной системы мониторинга данных о физической активности человека, были проведены эксперименты по оценке точности распознавания простой и сложной физической активности человека.

Результаты распознавания простой физической активности человека в зависимости от разного места крепления смартфона и выбранного информативного набора признаков представлены в табл. 1.

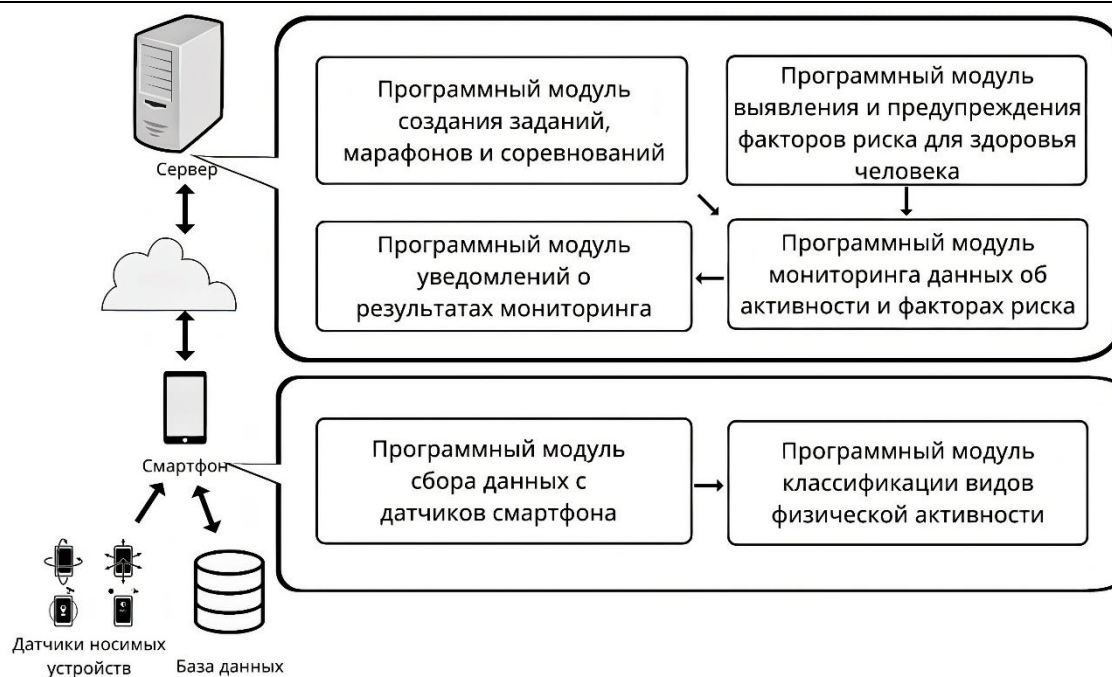


Рис. 3. Структура предлагаемой системы

Fig. 3. The proposed system structure

Таблица 1. Результаты распознавания простой физической активности

Table 1. Results of simple physical activity recognition

Место крепления смартфона / Smartphone attachment position	Точность распознавания при использовании подмножества информативных признаков / Accuracy of recognition while using subsets of informative features
В правом кармане джинсов	94,4 %
В левом кармане джинсов	97,6 %
На правом плече	95,7 %
На поясе	97,5 %

Для оценки сложной неопределенной активности человека был выбран сценарий поведения, который содержит такие виды активности, как «готовить завтрак, мыть посуду, разговаривать по телефону, одеваться и ужинать» для обучения и таких, как «готовить обед, личная гигиена и обедать» в качестве неопределенных классов соответственно.

Метрики качества распознавания для неопределенных классов сложной активности человека представлены в табл. 2.

Сравнивая разработанный метод с другими методами, основанными на визуальных данных (табл. 3), можно утверждать, что лучшая точность обусловлена тем, что объем входных данных намного меньше, чем при использовании визуальных данных датчиков.

Таблица 2. Результаты распознавания сложной физической активности**Table 2.** Results of complex physical activity recognition

Вид активности / Activity	Точность распознавания / Recognition accuracy
Готовить обед	95,85 %
Личная гигиена	96,15 %
Обедать	95,95 %

Таблица 3. Результаты других исследований**Table 3.** Results from other papers

Публикация / Published paper	Точность распознавания / Recognition accuracy
Alex, P.M.D. A. Research on Human Activity Identification Based on Image Processing and Artificial Intelligence	86%
Štuliene, A. Research on human activity recognition based on image classification methods	90,78%
Cao, X.H. A Simple yet Effective Model for Zero-Shot Learning	85%
Mishra, A. A Generative Approach to Zero-Shot and Few-Shot Action Recognition	73%

Выводы

Мониторинг и анализ данных о физической активности человека и факторов риска для его здоровья является важной задачей, так как позволяет оценить состояние здоровья, выявить его изменения, а также оценить влияние факторов на состояние человека.

Проведя обзор технологий для мониторинга физической активности человека, можно сделать вывод, что существующие решения позволяют решать только единичные задачи и обладают большим числом недостатков.

В данной работе с учетом всех необходимых требований к системе мони-

торинга физической активности человека была разработана структура системы. Также были проведены эксперименты по оценке точности распознавания простой и сложной активности человека. Эксперименты показали, что точность распознавания простой активности в среднем достигает 96%, а сложной неопределенной активности при известной семантике поведения человека – 95%.

Разработка и внедрение в жизнь человека системы мониторинга данных о физической активности, включающей себя инновационные технологии и методы, положительно повлияет на состояние и здоровье человека.

Список литературы

1. Занятия физической культурой и спортом и заболеваемость (в %) // Федеральная служба государственной статистики. URL: www.rosstat.gov.ru (дата обращения: 01.09.2021).
2. Godwin Ogbuabor and Robert La. 2018. Human Activity Recognition for Healthcare using Smartphones. In Proceedings of the 2018 10th International Conference on Machine Learning and Computing (ICMLC 2018). ACM, New York, NY, USA, 41-46.
3. Jordao, Artur & Antonio C. Nazare, Jr & Sena de Souza, Jessica & Schwartz, William. Human Activity Recognition Based on Wearable Sensor Data: A Standardization of the State-of-the-Art. 2018
4. Hasan S.S. et al. Human Activity Recognition using Smartphone Sensors with Context Filtering // ACHI 2016: The Ninth International Conference on Advances in Computer-Human Interactions. 2016. Vol. 571–572. P. 1019–1029.
5. Attila Reiss. Personalized mobile physical activity monitoring for everyday life (Doctoral Thesis, Technical University of Kaiserslautern). 2014
6. Jorge Luis Reyes Ortiz. Smartphone-based human activity recognition (Doctoral Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya). 2015
7. He Y., Li Y. Physical activity recognition utilizing the built-in Kinematic sensors of a smartphone // International Journal of Distributed Sensor Networks. SAGE Publications Sage UK: London, England, 2013. Vol. 2013. № 4. P. 481-580.
8. Miao F. et al. Identifying typical physical activity on smartphone with varying positions and orientations // Biomed. Eng. Online. BioMed Central, 2015. Vol. 14, № 1. P. 32-46.
9. Fitbit SmartTrack // Fitbit (дата обращения: 01.09.2021).
10. Mi Fit // Google Play Market (дата обращения: 01.09.2021).
11. Urban fit // Google Play Market (дата обращения: 01.09.2021).
12. Liangying Peng, Ling Chen, Zhenan Ye, and Yi Zhang. 2018. AROMA: A Deep Multi-Task Learning based Simple and Complex Human Activity Recognition Method Using Wearable Sensors. Proceedings of the ACM on Interactive Mobile Wearable and Ubiquitous Technologies. 2, 2, Article 74 (June 2018), 16 pages.
13. Li Liu, Yuxin Peng, Ming Liu, Zigang Huang, Sensor-based human activity recognition system with a multilayered model using time series shapelets. Knowledge-Based Systems. 2015. Vol. 90. P. 138-152.
14. Sakr N.A., Abu-Elkheir, M & Atwan, A & Soliman H.H. Current trends in complex human activity recognition // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2018. № 96. P. 4564-4583.

15. Higgins J.P. Smartphone applications for patients' health and fitness // *Am J Med.* 2016; 129(1): 11–9.
16. Buller D.B., Borland R., Bettinghaus E.P. et al. Randomized trial of a smartphone mobile application compared to text messaging to support smoking cessation // *Telemed J E Health.* 2014; 20(3): 206–14.
17. Vohralik S.L., Bowen A.R., Burns J. et al. Reliability and validity of a smartphone app to measure joint range // *Am J Phys Med Rehabil* 2015; 94(4): 325–30.
18. Показатели сердечно-сосудистой системы при физических нагрузках у спортсменов / Д.А. Усанов, А.А. Протопопов, А.В. Скрипаль и др. // *Саратовский научно-медицинский журнал.* 2013; 9(1): 64–8.
19. Rosney D.M., Horvath P.J. Exergaming Intervention in Sedentary Middle-Aged Adults Improves Cardiovascular Endurance, Balance and Lower Extremity Functional Fitness // *Heal. Sci J.* 2018. Vol. 12, № 6. P. 601.
20. YMoham T., Binti Alahad N. A Model for Mobile Exergame Development to Promote Anti-Sedentary Behaviour // *J. Inf. Syst. Res. Innov.* 2017. Vol. 11, № 3. P. 1–6.

References

1. Zanyatiya fizicheskoy kul'turoj i sportom i zaboлеваemost' (v %) [Physical culture and sports and morbidity (in %)]. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj statistiki* [Federal State Statistics Service]. Available at: www.rosstat.gov.ru (accessed: 01.09.2021).
2. Godwin Ogbuabor and Robert La. 2018. Human Activity Recognition for Healthcare using Smartphones. *In Proceedings of the 2018 10th International Conference on Machine Learning and Computing (ICMLC 2018)*. ACM, New York, NY, USA, 41-46.
3. Jordao, Artur & Antonio C. Nazare, Jr & Sena de Souza, Jessica & Schwartz, William. Human Activity Recognition Based on Wearable Sensor Data: A Standardization of the State-of-the-Art. 2018.
4. Hasan S.S. et al. Human Activity Recognition using Smartphone Sensors with Context Filtering. *ACHI 2016: The Ninth International Conference on Advances in Computer-Human Interactions*, 2016, vol. 571–572, pp. 1019–1029.
5. Attila Reiss. Personalized mobile physical activity monitoring for everyday life (Doctoral Thesis, Technical University of Kaiserslautern). 2014.
6. Jorge Luis Reyes Ortiz. Smartphone-based human activity recognition (Doctoral Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya). 2015.

7. He Y., Li Y. Physical activity recognition utilizing the built-in Kinematic sensors of a smartphone. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. SAGE Publications Sage UK: London, England, 2013, vol. 2013, no. 4, pp. 481-580.
8. Miao F. et al. Identifying typical physical activity on smartphone with varying positions and orientations. *Biomed. Eng. Online. BioMed Central*, 2015, vol. 14, no. 1, pp. 32-46.
9. Fitbit SmartTrack. Fitbit (accessed: 01.09.2021).
10. Mi Fit. Google Play Market (accessed: 01.09.2021).
11. Urban fit. Google Play Market (accessed: 01.09.2021).
12. Liangying Peng, Ling Chen, Zhenan Ye, and Yi Zhang. 2018. AROMA: A Deep Multi-Task Learning based Simple and Complex Human Activity Recognition Method Using Wearable Sensors. *Proceedings of the ACM on Interactive Mobile Wearable and Ubiquitous Technologies*. 2, 2, Article 74 (June 2018), 16 pages.
13. Li Liu, Yuxin Peng, Ming Liu, Zigang Huang, Sensor-based human activity recognition system with a multilayered model using time series shapelets. *Knowledge-Based Systems*, 2015, vol. 90, pp. 138-152.
14. Sakr N.A., Abu-Elkheir M., Atwan A., Soliman H.H. Current trends in complex human activity recognition. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2018, 96, pp. 4564-4583.
15. Higgins J.P. Smartphone applications for patients' health and fitness. *Am J Med*. 2016, 129(1):11-9.
16. Buller D.B., Borland R., Bettinghaus E.P. et al. Randomized trial of a smartphone mobile application compared to text messaging to support smoking cessation. *Telemed J E Health*. 2014; 20(3): 206-14.
17. Vohralik S.L., Bowen A.R., Burns J. et al. Reliability and validity of a smartphone app to measure joint range. *Am J Phys Med Rehabil*. 2015; 94(4): 325-30.
18. Usanov D.A., Protopopov A.A., Skripal' A.V. i dr. Pokazateli serdechno-sosudistoj sistemy pri fizicheskikh nagruzkah u sportsmenov [Indicators of the cardiovascular system during physical exertion in athlete]. *Saratovskij nauchno-meditsinskij zhurnal = Saratov Scientific and Medical Journal*. 2013;9(1):64-8.
19. Rosney D.M., Horvath P.J. Exergaming Intervention in Sedentary Middle-Aged Adults Improves Cardiovascular Endurance, Balance and Lower Extremity Functional Fitness. *Heal. Sci J*, 2018, vol. 12, № 6. P. 601.
20. Ymohan T., Binti AIAhad N. A Model for Mobile Exergame Development to Promote Anti-Sedentary Behaviour. *J. Inf. Syst. Res. Innov*, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 1-6.

Информация об авторах / Information about the Authors

Абрамова Елена Сергеевна, аспирант кафедры информационных систем и программной инженерии, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Российская Федерация, e-mail: abramova23es@yandex.ru

Elena S. Abramova, Post-Graduate Student, Information Systems and Software Engineering Department, Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs, Vladimir, Russian Federation, e-mail: abramova23es@yandex.ru

Орлов Алексей Александрович, доктор технических наук, заведующий кафедрой физики и прикладной математики, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Муром, Российская Федерация, e-mail: alexeyalexorlov@gmail.com

Alexey A. Orlov, Dr. of Sci. (Engineering), Head of Physics and Applied Mathematics Department, Murom Institute (branch) of Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs, Murom, Russian Federation, e-mail: alexeyalexorlov@gmail.com

Макаров Кирилл Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры физики и прикладной математики, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Муром, Российская Федерация, e-mail: kondistance@gmail.com

Kirill V. Makarov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Physics and Applied Mathematics Department, Murom Institute (branch) of Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs, Murom, Russian Federation, e-mail: kondistance@gmail.com

Управление поворотами мобильного робота, подобного автомобилю

А.Э.А. Кабалан¹, А.Р. Гайдук¹ ✉, Н. Абу Хамдан¹

¹ Южный федеральный университет, Институт радиотехнических систем и управления
пер. Некрасовский, д. 44, г. Таганрог 347922, Российская Федерация

✉ e-mail: gaiduk_2003@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данной работы является решение задачи синтеза подсистемы автоматического управления поворотами автономного, мобильного робота, подобного автомобилю (авторобота). Основная сложность решения этой задачи обусловлена неаддитивностью по управлению нелинейной математической модели, описывающей изменения направления движения авторобота.

Методы. Решение задачи получено на основе нового алгебраического полиномиально-матричного метода синтеза с применением квазилинейной модели. Предложенный подход позволяет получить аналитическое решение задачи синтеза систем управления, в том числе, и нелинейными неаддитивными объектами. Квазилинейная модель авторобота построена на основе нелинейных уравнений в переменных состояния.

Результаты. В данной статье показана возможность решения задачи синтеза дискретных систем управления неаддитивными нелинейными объектами. На основе нелинейных уравнений, описывающих повороты авторобота, которые являются неаддитивными по управлению, получена соответствующая квазилинейная модель. На основе этой модели синтезирована дискретная система управления поворотами автономного авторобота. Результаты компьютерного моделирования подтверждают работоспособность системы управления поворотами авторобота в автономном режиме.

Заключение. В работе синтезирована подсистема управления поворотами авторобота, которая обеспечивает требуемые изменения направления его движения, заданные некоторой временной программой. Показано, что алгебраический полиномиально-матричный метод синтеза систем управления с применением квазилинейных моделей позволяет синтезировать дискретные системы управления неаддитивными по управлению объектами. Для построения квазилинейных моделей нелинейных объектов необходимо, чтобы нелинейности объектов были дифференцируемыми по всем своим аргументам.

Ключевые слова: автономный авторобот; квазилинейная модель; поворот; курс авторобота; система управления.

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

Для цитирования: Кабалан А.Э.А., Гайдук А.Р., Абу Хамдан Н. Управление поворотами мобильного робота, подобного автомобилю // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 134-144. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-134-144>.

Поступила в редакцию 14.09.2021

Подписана в печать 07.10.2021

Опубликована 20.12.2021

Controlling the Turning of a Mobile Car-like Robot

A.E.A. Kabalan¹, Anatoliy R. Gaiduk¹ ✉, N.A. Hamdan¹

² Southern Federal University

44 Nekrasovsky Lane, Taganrog 347922, Russian Federation

✉ e-mail: gaiduk_2003@mail.ru

Abstract

Purpose of research is to solve the problem of the development of the subsystem of automatic control of turnings of an autonomous, mobile car-like robot (autorobot). The main difficulty of solving this problem is due to the non-additivity of the control of nonlinear mathematical model describing changes of autorobot movement direction.

Methods. The solution of the problem is obtained on the basis of a new algebraic polynomial-matrix synthesis method using a quasi-linear model. The proposed approach makes it possible to obtain an analytical solution to the problem of synthesis of control systems, including nonlinear non-additive objects. The quasi-linear model of the autorobot is based on nonlinear equations in state variables.

Results. This article shows the possibility of solving the problem of synthesis of discrete control systems for non-additive nonlinear objects. On the basis of nonlinear equations describing the robot turning which are non-additive in control, a corresponding quasi-linear model is obtained. Based on this model, a discrete turning control system of an autonomous robot was developed. The results of computer modeling confirm the operability of the autorobot's turning control system in offline mode.

Conclusion. A subsystem for controlling turnings of an autorobot, which provides the required changes in the direction of its movement, set by a certain time program is developed. It is shown that the algebraic polynomial-matrix method for the synthesis of control systems using quasi-linear models makes it possible to synthesize discrete control systems with non-additive control objects. To construct quasi-linear models of nonlinear objects, it is necessary for the nonlinearities of objects to be differentiable in all their arguments.

Keywords: autonomous autorobot; quasi-linear model; turning; autorobot's route; control system.

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

For citation: Kabalan A.E.A., Gaiduk A.R., Hamdan N.A. Controlling the Turning of a Mobile Car-like Robot. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 134-144 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-134-144>.

Received 14.09.2021

Accepted 07.10.2021

Published 20.12.2021

Введение

Проблема управления движением мобильных роботов, управление поворотами которых осуществляется аналогично автомобильному, рассматривалась многими исследователями [1-9]. На начальных этапах большое внимание уделялось разработке кинематиче-

ских контроллеров, поскольку автороботы чаще всего эксплуатировались на плоских участках. Так в работе [4] был создан адаптивный кинематический контроллер для управления телекамерой, используемой для отслеживания движущихся целей с использованием обратной связи по изображениям.

Однако в последнее время автороботы все чаще применяются для выполнения различных задач, таких как географические исследования, аварийно-спасательные, сельскохозяйственные работы и др. Требуется выполнение работ с высокой скоростью, а роботы все чаще имеют значительную массу. Поэтому современные исследования посвящены решению сложных задач разработки динамических систем управления автономными роботами [1, 2, 5-10]. Для этой цели применяются различные подходы. В работе [7] разработан алгоритм управления задней парковкой авторобота на основе нечеткой логики и проведено его моделирование. Здесь для получения команды управления углом поворота рулевых передних колес на каждом шаге управления используются операции фаззификации и дефаззификации с применением четырех нечетких правил. Однако в результате моделирования установлено, что столь простой контроллер не позволяет получить качественное управление мобильным роботом. Даксвангер и Шмидт для этой же цели использовали нечеткий и нейросетевой подход с визуальным контролем и автоматическим управлением направлением движения [8].

При создании системы управления автороботом сельскохозяйственного назначения в работе [9] разработаны и кинематическая, и динамическая математические модели, описывающие его движение по некоторой траектории, которая задается в глобальной системе координат.

На основе этих моделей с применением метода функций Ляпунова разработан закон нелинейного динамического управления формацией мобильных автороботов. Этот закон определяет необходимые изменения скорости и углов поворота для обеспечения движения формации автороботов по заданной траектории. В работе [10] синтез системы управления комбайном, предназначенным для уборки сельскохозяйственных культур, применялся метод синтеза систем, селективно инвариантных к внешним воздействиям.

Однако указанные выше методы являются довольно сложными и требуют значительных временных и материальных затрат как при синтезе систем управления, так и при технической реализации соответствующих контроллеров. Целью данной статьи является разработка квазилинейной модели поворотов авторобота, а также синтез дискретной подсистемы автоматического управления поворотами и её исследование. Математическая модель разрабатывается с учетом момента сопротивления повороту, а подсистема управления синтезируется с использованием нового алгебраического полиномиально-матричного метода синтеза нелинейных систем управления на основе полученной квазилинейной модели поворотов авторобота.

Материалы и методы

Полная математическая модель авторобота, описывающая все его движения на некоторой поверхности, получе-

на в работах [11, 12] на основе нелинейной модели мобильного робота, представленной в [13]. Последняя разработана без учета сил сопротивления как прямолинейному движению, так и поворотам робота. Подсистема управления скоростью движения рассматриваемого авторобота разработана в [12].

В соответствии с этой же работой канал управления изменениями направления движения (поворотами) рассматриваемого авторобота описывается следующей системой уравнений в переменных состояниях:

$$\dot{x}_2 = x_3, \quad (1)$$

$$\dot{x}_3 = -cx_3 + M_2 \sin(u_2) / 2I_g, \quad \varphi = x_2, \quad (2)$$

где x_2 – угол наклона продольной оси авторобота к оси Ох системы координат, т.е. x_2 – это угол поворота φ (рис. 1); x_3 – угловая скорость поворота авторобота вокруг его вертикальной оси, проходящей через центр тяжести g ; M_2 – вращающий момент, возникающий при отклонении передних рулевых колес на некоторый угол δ ; u_2 – управление поворотом. В данном случае этим управлением является угол δ ; cx_3 – момент вязкого сопротивления, пропорциональный угловой скорости поворота авторобота; I_g – момент инерции авторобота относительно вертикальной оси.

Проблема управления поворотами рассматриваемого авторобота осложняется тем, что его соответствующий канал управления является неаддитивным по управлению. Действительно, соглас-

но (2), управление u_2 входит в это уравнение нелинейно.

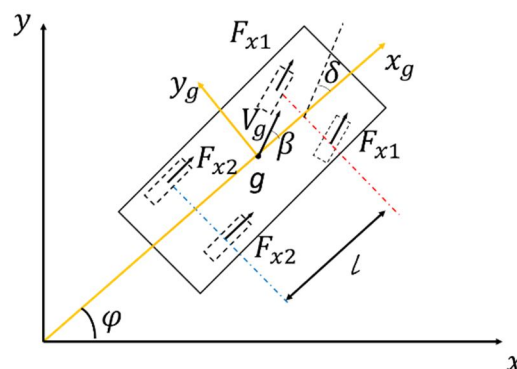


Рис. 1. Мобильный авторобот

Fig. 1. Mobile autorobot

Для преодоления этой сложности в данной работе предлагается использовать, предложенный алгебраический полиномиально-матричный (АПМ) метод синтеза систем автоматического управления (САУ) [12]. Помимо своей простоты и аналитического характера, этот метод позволяет решить задачу синтеза САУ как для аддитивных, так и для неаддитивных по управлению нелинейных объектов. Покажем эту возможность на примере решения рассматриваемой задачи.

Квазилинейная модель уравнений (1) и (2) в векторно-матричной форме имеет вид

$$\dot{\tilde{x}} = A(\tilde{x})\tilde{x} + b(u_2)u_2, \quad \varphi = [1 \quad 0]\tilde{x}, \quad (3)$$

где $\tilde{x} = [x_2 \quad x_3]^T$ – вектор состояния канала управления поворотами авторобота;

$$A(\tilde{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -c \end{bmatrix}, \quad b(u_2) = \begin{bmatrix} 0 \\ b_2(u_2) \end{bmatrix},$$

$$b_2(u_2) = a_2 u_2^{-1} \sin(u_2), \quad (4)$$

$$a_2 = M_2 / 2I_g.$$

При синтезе САУ АПМ методом искомого управления также описывается квазилинейной моделью следующего вида:

$$u_2 = k_0(\tilde{x}, u_2)\varphi^* - k^T(\tilde{x}, u_2)\tilde{x}, \quad (5)$$

где $k(\tilde{x}, u_2) = [k_1(\tilde{x}, u_2) \ k_2(\tilde{x}, u_2)]^T$ – функциональный вектор, а $k_0(\tilde{x}, u_2)$ – коэффициент, также зависящий в общем случае от переменных системы; φ^* – заданные значения угла поворота автобробота. При управлении (5) замкнутая система (3), (4), (5) описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= D(\tilde{x}, u_2)\tilde{x} + k_0(\tilde{x}, u_2)b(u_2)\varphi^*, \\ \varphi &= [1 \ 0]\tilde{x}, \end{aligned} \quad (6)$$

где матрица

$$D(\tilde{x}, u_2) = A(\tilde{x}) - b(u_2) \cdot k^T(\tilde{x}, u_2). \quad (7)$$

Характеристический полином $D(p, \tilde{x}, u_2) = \det(pE - D(\tilde{x}, u_2))$ матрицы (7) может быть представлен [15, 16] в виде суммы полиномов:

$$D(p, \tilde{x}, u_2) = A(p, \tilde{x}) + \sum_{i=1}^n k_i(\tilde{x}, u_2)V_i(p, \tilde{x}, u_2) \quad (8)$$

где

$$A(p, \tilde{x}) = \det(pE - A(\tilde{x})) = p^2 + cp, \quad (9)$$

$$V_i(p, \tilde{x}, u_2) = e_i \cdot \text{adj}(pE - A(\tilde{x})) \cdot b(u_2), \quad (10)$$

$i = 1, 2$.

Здесь e_i – i -я строка единичной матрицы E ; $\text{adj}(\cdot)$ – присоединенная матрица [17]. По формуле (10), с учетом (4), находятся полиномы:

$$\begin{aligned} V_1(p, u_2) &= b_2(u_2), \\ V_2(p, u_2) &= b_2(u_2)p. \end{aligned} \quad (11)$$

Для обеспечения устойчивости синтезируемой системы формируется гурвицевый полином:

$$D^*(p) = p^2 + \delta_1 p + \delta_0 \text{ второй степени,}$$

так как $n = 2$, и подставляется в (8) вместо полинома $D(p, \tilde{x}, u_2)$. Полиномы $D^*(p)$ и $A(p, \tilde{x})$ можно считать известными, поэтому, перенеся в (8) полином $A(p, \tilde{x})$ в левую часть, получаем, что сумма в правой части (8), содержащая искомые коэффициенты $k_i(\tilde{x}, u_2)$ удовлетворяет равенству

$$\sum_{i=1}^n k_i(\tilde{x}, u_2)V_i(p, \tilde{x}, u_2) = R(p, \tilde{x}, u_2), \quad (12)$$

где полином $R(p, \tilde{x}, u_2)$ равен разности известных полиномов:

$$\begin{aligned} R(p, x) &= D^*(p) - A(p, x) = \\ &= p^2 + \delta_1 p + \delta_0 - (p^2 + cp) = \\ &= (\delta_1 - c)p + \delta_0. \end{aligned} \quad (13)$$

Приравнявая коэффициенты в левой и в правой частях (12) с учетом выражений (11) и (13), получим систему n алгебраических уравнений, которая в данном случае имеет вид:

$$\begin{bmatrix} b_2(u_2) & 0 \\ 0 & b_2(u_2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ (\delta_1 - c) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Решение системы (14) позволяет записать выражения для искомых коэффициентов $k_i(u_2)$ из управления (5):

$$k_1(u_2) = \frac{\delta_0}{b_2(u_2)}, \quad k_2(u_2) = \frac{\delta_1 - c}{b_2(u_2)}. \quad (15)$$

Подставляя полученные выражения для коэффициентов $k_i(u_2)$ в равенство (7), будем иметь:

$$\begin{aligned} D(\tilde{x}, u_2) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_1 b_2(u_2) & -c - k_2 b_2(u_2) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\delta_0 & -\delta_1 \end{bmatrix} = D_c; \end{aligned} \quad (16)$$

Затем, подставляя результирующую матрицу $D(\tilde{x}, u_2) = D_c$ в (6), получим

$$\dot{\tilde{x}} = D_c \tilde{x} + b(u_2)k_0(u_2)\varphi^*, \quad \varphi = [1 \ 0]\tilde{x}. \quad (17)$$

Полученные уравнения (17) являются квазилинейной моделью замкнутой подсистемы канала управления поворотом авторобота. В данном случае системная матрица оказалась постоянной, а её характеристический полином удовлетворяет критерию Гурвица. Поэтому подсистема (17) является асимптотически устойчивой.

Для определения коэффициента $k_0(u_2)$ из управления (5) и уравнения (17), рассмотрим установившийся режим подсистемы (17), который существует в силу её устойчивости. В этом режиме при $\varphi^* = \varphi_0^* 1(t)$ и $t \gg 0$ производная $\dot{\tilde{x}} = 0$, вектор $\tilde{x} = \tilde{x}^0 = \text{const}$, управление $u = u_2^0$, а выход системы $\varphi^0 = c^T \tilde{x}^0$. Поэтому при $t \gg 0$ уравнение (17) принимает вид

$$0 = D_c \tilde{x}^0 + b(u_2^0)k_0(u_2^0)\varphi_0^*, \quad (18)$$

$$\varphi^0 = [1 \ 0]\tilde{x}^0.$$

Детерминант матрицы D_c не равен нулю, так как она устойчива, поэтому из (18) и условия $\varphi^0 = \varphi^*$ следует равенство

$$k_0(u_2^0) = \frac{\delta_0}{b_2(u_2^0)}. \quad (19)$$

Полученное выражение позволяет по (5) записать искомое управление поворотом авторобота

$$u_2 = \frac{u_2}{a_2 \sin(u_2)} \times (\delta_0(\varphi_0^* - x_2) - (\delta_1 - c)x_3). \quad (20)$$

На практике при непрерывной реализации управления воспользоваться выражением (20) невозможно, так как управление u_2 содержится и в левой и в правой части этого выражения. Эта сложность легко преодолевается при дискретной, цифровой реализации полученной подсистемы управления. Если выражение (19) подставить в (17) и промоделировать при малом значении шага интегрирования (порядка $dt = 0,02$), то можно установить, что значения управления $u_{2,k-1}$ и $u_{2,k}$, вычисляемые по выражению (20) очень близки друг к другу. Это позволяет при использовании цифровых средств управления, например, микроконтроллера, выражение (20) представить следующим образом:

$$u_{2,k+1} = \frac{u_{2,k}}{a_2 \sin(u_{2,k})} \times (\delta_0(\varphi_0^* - x_{2,k}) - (\delta_1 - c)x_{3,k}) \\ k = 1, 2, 3, \dots \quad (21)$$

Указанная замена вносит некоторые отклонения реального процесса управления от расчетного, но эти отклонения при малых T чрезвычайно малы и подавляются системой управления, так как она является устойчивой.

Результаты и их обсуждение

С целью исследования процесса управления объектом (1), (2) дискретным управлением (21), проведено компьютерное моделирование этой подсистемы в MATLAB при следующих значениях параметров: $M_2 = 2690$ Нм; $I_g = 1800$ Нмс²/рад; $c = 0,05$ с⁻¹; $\delta_0 = 2$, $\delta_1 = 3$ и $dt = 0,02$; $u_0 = 0,5$. Программа измене-

ния заданного угла поворота φ (курса) авторобота представлена на рис. 2,а. На рис. 2,б приведён график изменения угла поворота авторобота, полученный в результате моделирования подсистемы (1), (2), (21). При этом скорость изменения заданных значений угла φ была ограничена значением 2 рад/с.

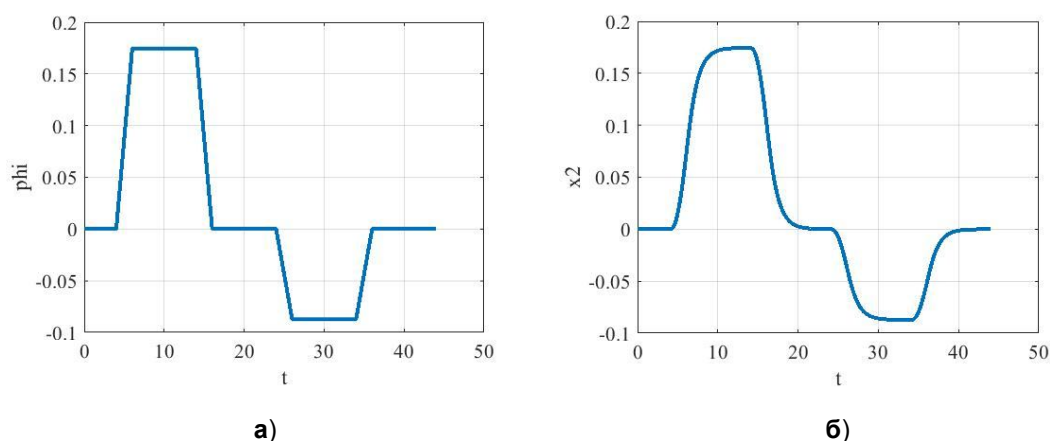


Рис. 2. Изменение направления движения авторобота:

а – программа курса; **б** – реальные изменения курса авторобота

Fig. 2. Changes of autorobot direction of motion: **a** – route program; **b** – actual changes of autorobot route

Как видно из графиков, длительность переходных процессов при изменении направления движения авторобота около 6 секунд, а установившиеся значения углов поворота соответствуют заданным значениям.

На рис. 2,а представлен график изменения управления u_2 , которым является, как отмечалось выше, угол поворота рулевых колес. Значения этого угла также ограничены и лежат в допустимом диапазоне; при этом знаки углов поворота рулевых колес в момент начала поворота совпадают с заданным изменением направления движения. Однако для обеспечения движения ав-

торобота в некотором направлении рулевые колеса поворачиваются подсистемой управления поворотами в двух противоположных направлениях.

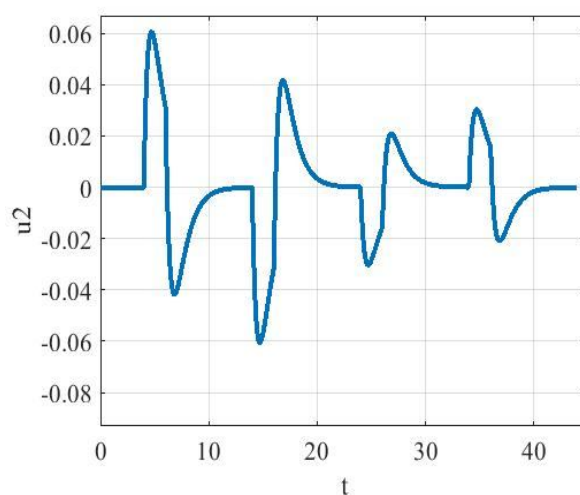


Рис. 3. Управление автороботом

Fig. 3. Autorobot control**Выводы**

В работе предложен алгебраический полиномиально-матричный метод синтеза систем управления с применением квазилинейных моделей, который позволяет синтезировать непрерывные системы управления нелинейными, ад-

дитивными по управлению объектами и дискретные системы управления неаддитивными по управлению объектами.

Предложенным методом решена задача синтеза подсистемы управления поворотами авторобота, которая обеспечивает его движение по траектории, заданной временной программой.

Список литературы

1. Wang B., Qian C., Chen Q. A Dynamics Controller Design Method for Car-like Mobile Robot Formation Control // MATEC Web of Conferences (EECR 2018). Vol. 160, Article No. 06003.
2. Sayyaadi H., Kouhi H., Salarieh H. Control of car-like (wheeled) multi robots for following and hunting a moving target // Scientia Iranica. 2011. Vol. 18. Is. 4. P. 950-965.
3. Синтез системы управления движением группы мобильных роботов в условиях неопределенности / А.Р. Гайдук, И.А. Каляев, С.Г. Капустян, И.О. Шаповалов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018; 22(4): 112-122. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-4-112-122>.
4. Chen X., Jia Y., Adaptive leader-follower formation control of non-holonomic mobile robots using active vision // IET Control Theory Applications. 2015. Vol. 9. Iss. 8. P. 1302-1311.
5. Разработка конструкции шагающего робота ANYWALKER / И.В. Рядчиков, С.И. Сеченев, А.А. Свидлов, А.Э. Бирюк, А.С. Прутский, А.А. Гусев, Е.В. Никульчев. М., 2019. С. 1215-1219.
6. Egerstedt M., Hu X., Stotsky A. Control of a car-like robot using a virtual vehicle approach // Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control. 1998. Vol. 2. P. 1502-1507.
7. Huang S-J, Lin G-Y. Parallel auto-parking of a model vehicle using a self-organizing fuzzy controller // Proceedings IMechE. 2010. Vol. 224. P. 997-1012.
8. Daxwanger W.A., Schmidt G.K. Skill-Based Visual Parking Control Using Neural and Fuzzy Networks // IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century. 1995. Vol. 2. P. 1659-1664.
9. Hameed A. Intelligent Coverage Path Planning for Agricultural Robots and Autonomous Machines on Three-Dimensional Terrain // J. Intell. Robot Syst. 2014. Vol. 74. P. 965-983.
10. Gaiduk A., Medvedev M., Pshikhov V. Selectively Invariant Control Systems Design of the Unmanned Mobile Robots' Movement // International Conference on Electrical,

Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Mauritius, 2021. Article No. 10. P. 1-5.

11. Кабалан А.Э.А., Гайдук А.Р. Построение квазилинейной модели мобильного робота на основе CGA-модели // Проблемы автоматизации. Региональное управление. Связь и автоматика (ПАРУСА-2019): сборник трудов VIII Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (Геленджик, 6– 8 ноября): в 2 т. / Южный федеральный университет; сост. Ю.Б. Щемелева, С.В. Кирильчик. Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. Т. 1. С. 91-95.

12. Кабалан А.Э.А., Гайдук А.Р. Преобразование модели автономного робота // Математические методы в технологиях и технике. Научный журнал. 2021. Т. 7. С. 27-30.

13. Sharma B., Vanualailai J., Chand U. Flocking of Multi-agents in Constrained Environments // European Journal of Pure and Applied Mathematics. 2009. Vol. 2. No. 3. P. 401-425.

14. Gaiduk A.R., Stojković N.M., Plaksienko E.A. Analytical design of nonlinear control systems // FACTA UNIVERSITATIS. Series: Automatic Control and Robotics. 2016. Vol. 13, No. 4. P. 61-68.

15. Гайдук А.Р. Непрерывные и дискретные динамические системы. М.: УМ и ИЦ «Учебная литература», 2004. 252 с.

16. Гайдук А.Р. К синтезу квазилинейных гурвицевых систем управления // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18(3). С. 678-705.

17. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 1988. 552 с.

References

1. Wang B., Qian C., Chen Q. A Dynamics Controller Design Method for Car-like Mobile Robot Formation Control. *MATEC Web of Conferences (EECR 2018)*, vol. 160, Article No. 06003.

2. Sayyaadi H., Kouhi H., Salarieh H. Control of car-like (wheeled) multi robots for following and hunting a moving target. *Scientia Iranica*, 2011, vol. 18, is. 4, pp. 950-965.

3. Gaiduk A.R., Kalyaev I.A., Kapustyan S.G., Shapovalov I.O. Sintez sistemy upravleniya dvizheniem gruppy mobil'nykh robotov v usloviyakh neopredelennosti [Design of the Control System by Movement of Robots Mobile Group in Conditions of Uncertainty]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 4(79), pp. 112-122 <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-4-112-122>. (in Russ.).

4. Chen X., Jia Y. Adaptive leader-follower formation control of non-holonomic mobile robots using active vision. *IET Control Theory Applications*, 2015, vol. 9, is. 8, pp. 1302-1311.

5. Ryadchikov I.V., Sechenov S.I., Svidlov A.A., Biryuk A. E., Prutskiy A. S., Gusev A.A., Nikulchev E.V. *Razrabotka konstruktssii shagayushchego robota ANYWALKER* [Development of a design of the walking robot ANY-WALKER]. Moscow, 2019, pp. 1215-1219.
6. Egerstedt M., Hu X., Stotsky A. Control of a car-like robot using a virtual vehicle approach. *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control*, 1998, vol. 2, pp. 1502-1507.
7. Huang S-J, Lin G-Y. Parallel auto-parking of a model vehicle using a self-organizing fuzzy controller. *Proceedings IMechE*, 2010, vol. 224, pp. 997-1012.
8. Daxwanger W.A., Schmidt G.K. Skill-Based Visual Parking Control Using Neural and Fuzzy Networks. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century*, 1995, vol. 2, pp. 1659-1664.
9. Hameed A. Intelligent Coverage Path Planning for Agricultural Robots and Autonomous Machines on Three-Dimensional Terrain. *J. Intell. Robot Syst*, 2014, vol. 74, pp. 965-983.
10. Gaiduk A., Medvedev M., Pshikhov V. Selectively Invariant Control Systems Design of the Unmanned Mobile Robots' Movement. *International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*, Mauritius, 2021, Article, No. 10, pp. 1-5.
11. Kabalan A.E.A., Gaiduk A.R. [Constriction of quasilinear model of the mobile robot on the basis of CGA model]. *Sbornik trudov VIII Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii molodykh uchennykh, aspirantov i studentov* [Automation Problems. Regional management. Communication and automatic equipment (PARUSA-2019). Collection of works VIII of the All-Russian scientific conference of young scientists, graduate students and students]. Rostov-na-Donu; Taganrog, 2019, vol. 1, pp. 91-95.
12. Kabalan A.E.A., Gaiduk A.R. Preobrazovanie modeli avtonomnogo robota [Model conversation of autonomous robot]. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* *Mathematical Methods in Technologies and Technique*, 2021, vol. 7, pp. 27-30.
13. Sharma B., Vanualailai J., Chand U. Flocking of Multi-agents in Constrained Environments. *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2009, vol. 2, no. 3, pp. 401-425.
14. Gaiduk A.R., Stojković N.M., Plaksienko E.A. Analytical design of nonlinear control systems. *FACTA UNIVERSITATIS. Series: Automatic Control and Robotics*, 2016, vol. 13, no. 4, pp. 61-68.
15. Gaiduk A.R. *Nepreryvnye i diskretnye dinamicheskie sistemy* [Continuous and Discrete in Time Dynamic Systems]. Moscow, 2004, 252 p.
16. Gaiduk A.R. K sintezu kvazilineinykh gurvitsevykh sistem upravleniya [To Design of Quasilinear Hurwitz Control Systems]. *Trudy SPIIRAN = Works of SPIIRAN*, 2019, vol. 18(3), pp. 678-705.

17. Gantmakher F.R. *Teoriya matrits* [Theory of matrixes]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 552 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Кабалан А.Э.А., аспирант, Южный федеральный университет, Институт радиотехнических систем и управления, г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: ali.kabalan.92@gmail.com

A.E.A. Kabalan, Post-Graduate Student, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation, e-mail: ali.kabalan.92@gmail.com

Гайдук Анатолий Романович, профессор, Южный федеральный университет, Институт радиотехнических систем и управления, г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: gaiduk_2003@mail.ru

Anatoliy R. Gaiduk, Professor, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation, e-mail: gaiduk_2003@mail.ru

Абу Хамдан Н., аспирант, Южный федеральный университет, Институт радиотехнических систем и управления, г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: dr.nizar.abou.hamdane@gmail.com

N.A. Hamdan, Post-Graduate Student, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation, e-mail: dr.niar.abou.hamdane@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-145-161>

Модель параметров отклонений маршрута полёта беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории

В. Г. Андронов¹✉, А. А. Чуев¹, А. А. Князев¹

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

✉ e-mail: vladia58@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Расширение инструментария использования систем цифрового видеонаблюдения в интересах автономной навигации беспилотных летательных аппаратов в условиях потери сигналов от спутников.

Методы. Разработка математической модели отклонений беспилотного летательного аппарата от заданной траектории основана на теории фотограмметрии в части математического описания взаимной ориентации пары аэрокосмических снимков и параллакс соответственных точек в зоне их перекрытия.

Результаты. Разработана математическая модель, устанавливающая функциональную связь параметров отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории и изменений продольного и поперечного параллакс перекрывающихся изображений подстилающей поверхности, обусловленных этими отклонениями. Получены количественные оценки влияния параметров отклонений на величину изменений продольного и поперечного параллакс соответственных точек перекрывающихся изображений.

Заключение. Полученные функциональные зависимости обеспечивают возможность автономного обнаружения и оценки уровня отклонений беспилотного летательного аппарата от заданной траектории по углам тангажа, крена и рыскания, а также по высоте и направлению полёта. При этом кроме изображений подстилающей поверхности, получаемых и обрабатываемых в процессе полёта на борту беспилотных летательных аппаратов, не требуется использование другой информации, в том числе цифровых карт района их применения.

Ключевые слова: навигация; беспилотный летательный аппарат; фотограмметрическая модель; аэрофотосъёмка.

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

Для цитирования: Андронов В. Г., Чуев А. А., Князев А. А. Модель параметров отклонений маршрута полёта беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 145-161. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-145-161>.

Поступила в редакцию 30.11.2021

Подписана в печать 09.12.2021

Опубликована 20.12.2021

Model of Parameters of the Flight Route Deviation of Unmanned Aerial Vehicles from a Specified Trajectory

Vladimir G. Andronov ¹ ✉, Andrey A. Chuev ¹, Alexander A. Knyazev ¹

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

✉ e-mail: vladia58@mail.ru

Abstract

Purpose of research is to broaden the tools for using digital video surveillance systems for navigation of unmanned aerial vehicles in conditions of loss of signals from satellites.

Methods. The development of a mathematical model of deviations of an unmanned aerial vehicle from a specified trajectory is based on the theory of photogrammetry in terms of a mathematical description of the mutual orientation of a pair of aerospace images and parallaxes of the corresponding points in their overlap zone.

Results. A mathematical model that determines a functional relationship between the parameters of deviations of unmanned aerial vehicles from a given trajectory and changes in the longitudinal and transverse parallaxes of overlapping images of the underlying surface caused by these deviations, was developed. Quantitative estimates of the influence of deviation parameters on the magnitude of changes in the longitudinal and transverse parallaxes of the corresponding points of overlapping images were obtained.

Conclusion. The obtained functional dependencies provide the possibility of autonomous detection and assessment of the level of deviations of an unmanned aerial vehicle from a given trajectory in pitch, roll and yaw angles, as well as in altitude and direction of flight. At the same time, in addition to images of the underlying surface obtained and processed during flight on board unmanned aerial vehicles, the use of other information, including digital maps of the area of their application, is not required.

Keywords: navigation; unmanned aerial vehicle; photogrammetric model; aerial photography.

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

For citation: Andronov V. G., Chuev A. A., Knyazev A. A. Model of Parameters of the Flight Route Deviation of Unmanned Aerial Vehicles from a Specified Trajectory. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 145-161 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-145-161>.

Received 30.11.2021

Accepted 09.12.2021

Published 20.12.2021

Введение

В настоящее время автоматическое управление в беспилотных летательных аппаратах (БЛА) осуществляется по данным от систем инерциальной и/или спутниковой навигации. Типовой состав контура инерциальной навигации современных БЛА включает в себя гироскопы, датчики угловых скоростей,

акселерометры, барометрические высотометры, магнитометры [1-5]. Они обеспечивают получение и выдачу в систему автоматического управления информации о текущей ориентации БЛА по углам тангажа, крена и рыскания, его координатам, скорости и высоте полёта. Основным недостатком инерциальных систем БЛА, обусловленным накопле-

нием ошибок измерения, является зависимость точности от длительности автономной работы. При этом из-за ограничений по массе полезной нагрузки и габаритам БЛА наиболее высокая скорость накопления ошибок характерна для микро БЛА самолётного типа весом до пяти килограмм. Поэтому на практике при высоких требованиях к точности навигации БЛА совместно с контуром инерциальной навигации используется приемник GPS, по сигналам которого выполняется планово-периодическая коррекция инерциальных измерений¹ [6-8]. Это обеспечивает существенное повышение точности выработки полного навигационного решения по текущим координатам и углам ориентации БЛА. Вместе с тем известно [7-13], что в процессе полёта БЛА возможны потеря сигналов от спутников и отклонение маршрута полёта БЛА от заданной траектории, что может привести к снижению эффективности его целевого применения.

В этой связи актуальной является задача использования на борту БЛА дополнительных автономных систем, в частности систем цифровой видеонаблюдения подстилающей поверхности [14-19], и исследования их возможностей по повышению точности инерциальных измерений в условиях потере сигналов от спутников.

¹ ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения (с поправками). М.: Изд-во стандартов, 1981.

Материалы и методы

Процесс автоматического управления полётом БЛА по заданной траектории можно декомпозировать на три этапа. На первом этапе решается задача непрерывного слежения за параметрами полёта БЛА с целью обнаружения отклонений от заданной траектории и оценки уровня их влияния на эффективность выполнения поставленных целевых задач. Вторым этапом является обнаружение отклонений наблюдаемых параметров превышающих априорно задаваемый допустимый уровень. В этом случае решается задача определения их величины и выдача этих данных в автопилот. На третьем этапе выполняется устранение выявленных отклонений и возвращение БЛА на заданную траекторию. В данной работе предметом исследования является первый этап.

Вербальная постановка задачи

Будем полагать, что заданная траектория в штатном режиме полёта БЛА представляет собой прямолинейный горизонтальный маршрут, под которым здесь и далее понимается отсутствие программных (координированных) маневров по углам тангажа, крена и рыскания. При этом какое-то время после выхода БЛА на заданную траекторию сигналы от навигационных спутников поступают и используются интегрированной навигационной системой в штатном режиме. Параллельно этому цифровой фотокамерой на матрицах ПЗС, расположенной на борту БЛА перпендикулярно его

продольной оси, производится непрерывная регистрация перекрывающихся изображений подстилающей поверхности. Пусть в какой-то момент времени происходит потеря сигналов от спутников и в этих условиях возникают некоррелированные отклонения БЛА от заданной траектории, под которыми здесь и далее понимаются отклонения БЛА по углам тангажа, крена и рыскания, не превышающие пяти градусов.

Необходимо разработать математическую модель, устанавливающую функциональную связь параметров этих отклонений с фотограмметрическими характеристиками перекрывающихся изображений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- построение координатного пространства, связанного с БЛА и перекрывающимися изображениями;
- разработка математической модели, устанавливающей функциональную связь параметров отклонений БЛА от заданной траектории с фотограмметри-

ческими характеристиками перекрывающихся изображений;

- исследование влияния параметров отклонений траектории БЛА на величину изменений фотограмметрических характеристик перекрывающихся изображений.

Системы координат БЛА и изображений

Введём систему координат (СК) $SXYZ$, связанную с БЛА (рис.1).

Начало S разместим в центре проекции цифровой фотокамеры, который расположен в центре тяжести БЛА. Ось SX направим вдоль продольной оси БЛА в сторону полёта r , а оси SY и SZ – соответственно влево и вверх относительно направления полёта. Очевидно, что в штатном режиме горизонтального полёта БЛА (рис.2) его продольная ось будет параллельна местной горизонтали 1 и перпендикулярна местной вертикали 2, плоскость 3 параллельна плоскости местного горизонта, а плоскости 4 и 5 – перпендикулярны к ней соответственно в вертикальном и поперечном направлении.

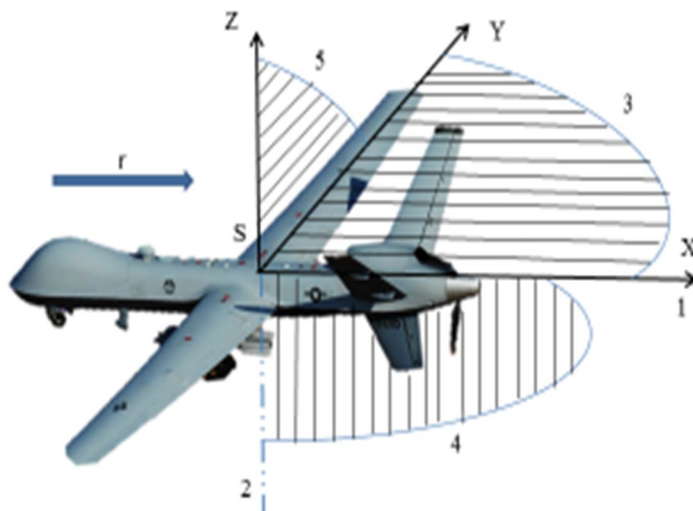


Рис. 1. Система координат SXYZ

Fig. 1. The SXYZ coordinate system

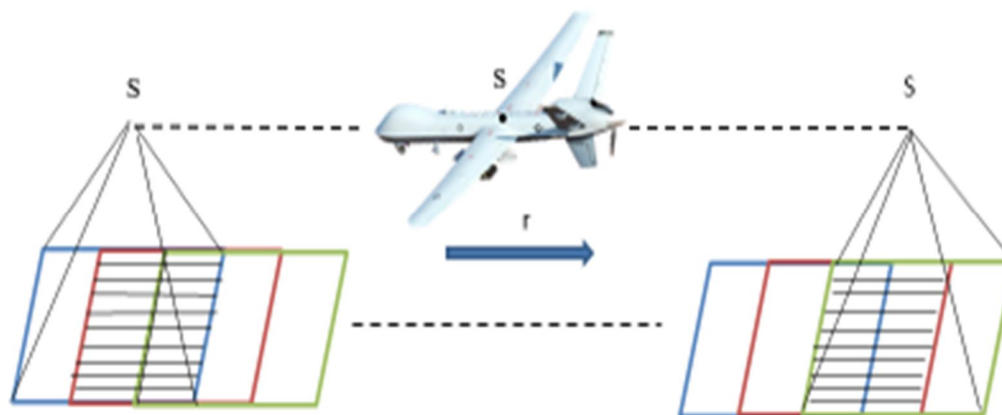


Рис. 2. Режим горизонтального полёта БЛА

Fig. 2. UAV horizontal flight mode

Положим далее, что из центров проекций S_1 и S_2 получены перекрывающиеся изображения P_1 и P_2 (рис.3,а).

При этом изображение P_1 получено в штатном режиме горизонтального по-

лёта БЛА и называется далее горизонтальным, а P_2 – в условиях возникших некоординированных отклонений БЛА углам тангажа ν , крена ω и рыскания τ и называется далее наклонным.

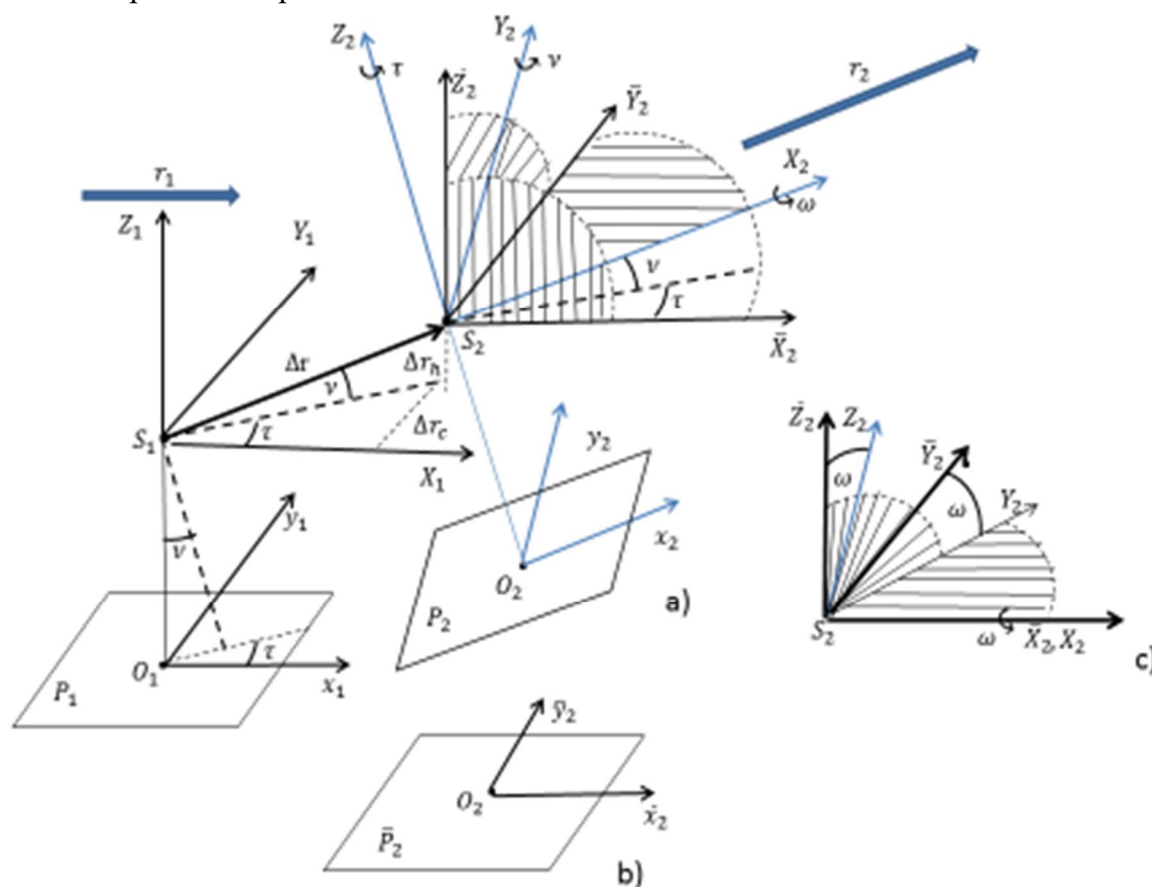


Рис. 3. Системы координат БЛА и перекрывающихся изображений

Fig. 3. UAV coordinate systems and overlapping images

В соответствии с ГОСТ ν – угол между продольной осью БЛА и плоскостью местного горизонта; ω – угол между поперечной осью БЛА и плоскостью местного горизонта, а τ – угол между проекциями его продольной оси на горизонтальную плоскость при заданной и возмущённой траектории полёта БЛА¹.

Параметры $\Delta r_c = \Delta r_s \operatorname{tg} \tau$ и $\Delta r_h = \Delta r_s (\operatorname{tg} \nu / \cos \tau)$ характеризуют отклонения траектории r_2 от r_1 по направлению и высоте полёта БЛА, где Δr_s – расстояние между центрами проекций S_1 и S_2 в плоскости местного горизонта.

Введём СК БЛА $S_1X_1Y_1Z_1$ и $S_2X_2Y_2Z_2$, а также СК изображений $O_1x_1y_1$, $O_2x_2y_2$, начала которых O_1 и O_2 расположим в геометрических центрах изображений P_1 и P_2 , а оси направим параллельно соответствующих осей СК БЛА. Будем также считать, что горизонтальное изображение \bar{P}_2 (рис.3,б) получено путём трансформирования изображения P_2 в горизонтальную проекцию. При этом оси СК $O_2\bar{x}_2\bar{y}_2$ параллельны осям СК $O_1x_1y_1$ и $S_2\bar{X}_2\bar{Y}_2\bar{Z}_2$.

Определим взаимную ориентацию СК $S_1X_1Y_1Z_1$ и $S_2X_2Y_2Z_2$ путём совмещения осей СК $S_2X_2Y_2Z_2$ и $S_2\bar{X}_2\bar{Y}_2\bar{Z}_2$. При этом отметим следующее¹.

Угол ν считается положительным, если продольная ось БЛА находится выше горизонтальной плоскости, а по-

ложительное направление оси S_2Z_2 смещено назад относительно местной вертикали по направлению полёта. Тогда совмещение осей S_2Z_2 и $S_2\bar{Z}_2$ производится путём вращения вокруг оси Y_2 на угол ν против часовой стрелки. Угол ω (см. рис. 3,с) считается положительным, если положительное направление оси S_2Y_2 находится ниже плоскости местного горизонта. При этом ось S_2Y_2 совмещается с осью $S_2\bar{Y}_2$ поворотом вокруг оси X_2 на угол ω против часовой стрелки. Угол τ считается положительным, если положительное направление оси S_2X_2 находится справа по направлению полёта БЛА. В этом случае оси S_2X_2 и $S_2\bar{X}_2$ совмещаются путём поворота вокруг оси Z_2 на угол τ против часовой стрелки. Поскольку на рис. 3,а направление оси S_2X_2 показано слева от направления полёта БЛА, поворот вокруг оси Z_2 производится на угол $-\tau$. При этом вращения вокруг осей на углы $-\tau$, ω и ν выполняются в последовательности $S_2Z_2 \rightarrow S_2X_2 \rightarrow S_2Y_2$, а перемножение полученных матриц поворотов – в обратном порядке.

Тогда матрица направляющих косинусов

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

описывающая взаимную ориентацию осей СК $S_2X_2Y_2Z_2$ и $S_2\bar{X}_2\bar{Y}_2\bar{Z}_2$, и соответственно осей $S_1X_1Y_1Z_1$ и $S_2X_2Y_2Z_2$, будет иметь следующий вид:

$$A = A_\nu A_\omega A_\tau, \quad (2)$$

¹ ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения (с поправками). М.: Издательство стандартов, 1981.

где

$$A_v = \begin{vmatrix} \cos v & 0 & \sin v \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin v & 0 & \cos v \end{vmatrix};$$

$$A_\omega = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{vmatrix};$$

$$A_\tau = \begin{vmatrix} \cos \tau & -\sin \tau & 0 \\ \sin \tau & \cos \tau & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$a_{11} = \cos v \cos \tau - \sin v \sin \omega \sin \tau;$$

$$a_{12} = -\cos v \sin \tau - \sin v \sin \omega \cos \tau;$$

$$a_{13} = \sin v \cos \omega;$$

$$a_{21} = \cos \omega \sin \tau;$$

$$a_{22} = \cos \omega \cos \tau;$$

$$a_{23} = \sin \omega;$$

$$a_{31} = -\sin v \cos \tau - \cos v \sin \omega \sin \tau;$$

$$a_{32} = \sin v \sin \tau - \cos v \sin \omega \cos \tau;$$

$$a_{33} = \cos v \cos \omega.$$

При этом переход от СК X_2, Y_2, Z_2 к $\bar{X}_2, \bar{Y}_2, \bar{Z}_2$ будет описываться следующими выражениями [12]:

$$\begin{pmatrix} \bar{X}_2 \\ \bar{Y}_2 \\ \bar{Z}_2 \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

$$\bar{X}_2 = a_{11}X_2 + a_{12}Y_2 + a_{13}Z_2.$$

$$\bar{Y}_2 = a_{21}X_2 + a_{22}Y_2 + a_{23}Z_2. \quad (4)$$

$$\bar{Z}_2 = a_{31}X_2 + a_{32}Y_2 + a_{33}Z_2.$$

Поскольку оси СК $S_2 X_2 Y_2 Z_2$ и $O_2 x_2 y_2 z_2$ параллельны, $X_2 = x_2; Y_2 = y_2; Z_2 = -f$, где f – фокусное расстояние цифровой фотокамеры. Подставив эти выражения в (4), получим:

$$\begin{aligned} \bar{X}_2 &= a_{11}x_2 + a_{12}y_2 - a_{13}f; \\ \bar{Y}_2 &= a_{21}x_2 + a_{22}y_2 - a_{23}f; \\ \bar{Z}_2 &= a_{31}x_2 + a_{32}y_2 - a_{33}f. \end{aligned} \quad (5)$$

Формулы обратного перехода от СК $\bar{X}_2, \bar{Y}_2, \bar{Z}_2$ к X_2, Y_2, Z_2 имеют следующий вид:

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = A^T \begin{pmatrix} \bar{X}_2 \\ \bar{Y}_2 \\ \bar{Z}_2 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

$$\begin{aligned} X_2 &= a_{11}\bar{X}_2 + a_{21}\bar{Y}_2 - a_{31}f; \\ Y_2 &= a_{12}\bar{X}_2 + a_{22}\bar{Y}_2 - a_{32}f; \\ Z_2 &= a_{13}\bar{X}_2 + a_{23}\bar{Y}_2 - a_{33}f. \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} X_2 &= a_{11}\bar{x}_2 + a_{21}\bar{y}_2 - a_{31}f; \\ Y_2 &= a_{12}\bar{x}_2 + a_{22}\bar{y}_2 - a_{32}f; \\ Z_2 &= a_{13}\bar{x}_2 + a_{23}\bar{y}_2 - a_{33}f. \end{aligned} \quad (8)$$

И, наконец, взаимосвязь плоских координат точек изображений P_2 и \bar{P}_2 в СК $O_2 x_2 y_2 z_2$ и $O_2 \bar{x}_2 \bar{y}_2 \bar{z}_2$ с учётом выражений (1) – (2) будет определяться известными соотношениями [6-8]:

$$\begin{cases} \bar{x}_2 = -f \frac{a_{11}\bar{X}_2 + a_{21}\bar{Y}_2 - a_{31}f}{a_{31}x_2 + a_{32}y_2 - a_{33}f}; \\ \bar{y}_2 = -f \frac{a_{12}\bar{X}_2 + a_{22}\bar{Y}_2 - a_{32}f}{a_{31}x_2 + a_{32}y_2 - a_{33}f}. \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} x_2 = -f \frac{a_{11}\bar{x}_2 + a_{21}\bar{y}_2 - a_{31}f}{a_{13}\bar{x}_2 + a_{23}\bar{y}_2 - a_{33}f}; \\ y_2 = -f \frac{a_{12}\bar{x}_2 + a_{22}\bar{y}_2 - a_{32}f}{a_{13}\bar{x}_2 + a_{23}\bar{y}_2 - a_{33}f}. \end{cases} \quad (10)$$

Полученные функциональные зависимости (1) – (10) создают математическую основу для организации фотограмметрической обработки перекрывающихся изображений в интересах автономной навигации и ориентации БЛА.

Модель параметров отклонений траектории БЛА

В качестве характеристик перекрывающихся изображений, позволяющих оценить возникновение и уровень некоординированных отклонений маршрута полёта БЛА от заданной траектории, будем использовать значения их про-

дольных и поперечных параллаксов. Тогда, учитывая определения параллаксов перекрывающихся изображений [14, 18, 19] и принятые в формулах (1) – (10) обозначения, запишем:

$$p_1 = p_{\text{ш}} = x_1 - \bar{x}_2; q_1 = q_{\text{ш}} = y_1 - \bar{y}_2. \quad (11)$$

$$p_2 = p_{\text{нш}} = x_1 - x_2; q_2 = q_{\text{нш}} = y_1 - y_2. \quad (12)$$

В выражениях (11) – (12) p_1, q_1 – продольные и поперечные параллаксы точек на перекрывающихся изображениях P_1, \bar{P}_2 , полученных в штатном режиме горизонтального полёта БЛА; p_2, q_2 – продольные и поперечные параллаксы точек на перекрывающихся изображениях P_1, P_2 , последнее из которых получено в нештатном режиме.

Найдём разницы параллаксов $\Delta p = p_2 - p_1$ и $\Delta q = q_2 - q_1$. С учётом выражения (10) имеем:

$$\Delta p = \bar{x}_2 + f \frac{a_{11}\bar{x}_2 + a_{21}\bar{y}_2 - a_{31}f}{a_{13}\bar{x}_2 + a_{23}\bar{y}_2 - a_{33}f}. \quad (13)$$

$$\Delta q = \bar{y}_2 + f \frac{a_{12}\bar{x}_2 + a_{22}\bar{y}_2 - a_{32}f}{a_{13}\bar{x}_2 + a_{23}\bar{y}_2 - a_{33}f}. \quad (14)$$

Преобразуем формулы $\Delta r_c = \Delta r_s \operatorname{tg} \tau$, $\Delta r_h = \Delta r_s (\operatorname{tg} v / \cos \tau)$ и выражения (3) на основе известных разложений тригонометрических функций $\sin x$, $\cos x$ в ряд Тейлора [18]:

$$\sin x = x; \quad \cos x = 1 - \frac{1}{2}x^2;$$

$$\operatorname{tg} x = x.$$

$$\Delta r_c = \Delta r_s \tau. \quad (15)$$

$$\Delta r_h = \Delta r_s (v / (1 - \frac{1}{2}\tau^2)). \quad (16)$$

Отбросив слагаемые, содержащие в выражении (3) произведения и степени

углов больше второго порядка (например, $\tau^2 v$, $v\omega\tau$), имеем:

$$a_{11} = 1 - \frac{1}{2}(v^2 + \tau^2).$$

$$a_{12} = -(\tau + v).$$

$$a_{13} = v.$$

$$a_{21} = \tau.$$

$$a_{22} = 1 - \frac{1}{2}(\omega^2 + \tau^2) \quad (17)$$

$$a_{23} = \omega.$$

$$a_{31} = -(v + \omega\tau).$$

$$a_{32} = v\tau - \omega.$$

$$a_{33} = 1 - \frac{1}{2}(v^2 + \omega^2).$$

После несложных преобразований получим:

$$\Delta p = \bar{x}_2 - P(1 - \gamma)^{-1}. \quad (18)$$

$$\Delta q = \bar{y}_2 - Q(1 - \gamma)^{-1}, \quad (19)$$

где $P = \bar{x}_2 - \frac{1}{2}\bar{x}_2(v^2 + \tau^2) + \bar{y}_2\tau + f(v + \omega\tau)$;

$$Q = \bar{y}_2 - \frac{1}{2}\bar{y}_2(\omega^2 + \tau^2) - \bar{x}_2(v + \tau) - f(v\tau - \omega);$$

$$\gamma = \frac{\bar{x}_2}{f}v + \frac{\bar{y}_2}{f}\omega + \frac{1}{2}(v^2 + \omega^2).$$

На основе известного разложения [14] в ряд $(1 - \gamma)^{-1} = 1 + \gamma + \gamma^2 + \dots$ и отбросив слагаемые, содержащие произведения углов и/или координат больше второго порядка (например, $\tau^2 v$, $v\omega\tau$, $\bar{x}_2\bar{y}_2^2$), окончательно имеем:

$$\Delta p = -\frac{1}{2}\bar{x}_2(\omega^2 - \tau^2) - \frac{\bar{x}_2\bar{y}_2}{f}(v\tau + \omega) - f(\omega\tau + v) - \frac{\bar{x}_2^2}{f}v - \bar{y}_2\tau. \quad (20)$$

$$\Delta q = \frac{1}{2}\bar{y}_2(v^2 - \tau^2) + \bar{x}_2(v + \tau) -$$

$$- \frac{\bar{x}_2\bar{y}_2}{f}v - \frac{\bar{y}_2^2}{f}\omega + f(v\tau - \omega). \quad (21)$$

Результаты и их обсуждение

Полученные выражения (15) – (16) и (20) – (21) описывают математическую модель параметров линейных и угловых отклонений маршрута БЛА от заданной траектории горизонтального полёта. При этом методическая погрешность модели не превышает 0,9%, что не критично для решения поставленных задач. Параметры $\Delta p, \Delta q$ представляют собой разницу параллаксов соответственных точек между смежными перекрывающимися снимками, полученными в различных режимах полёта БЛА. В штатном режиме полёта БЛА все смежные перекрывающиеся снимки по условиям задачи являются горизонтальными, а в нештатном – один снимок является горизонтальным, а второй – наклонным, т.е. полученным при некоординированных отклонениях БЛА по углам тангажа, крена и рыскания. Нетрудно убедиться, что при $\nu = \omega = \tau = 0$ разница параллаксов $\Delta p = \Delta q = 0$. При этом из выражений (11) – (12) вытекает, что для всех точек смежных горизонтальных снимков выполняются следующие условия:

$$\begin{cases} x_{i+1} - x_i = p_{\text{ш}} = \text{const}; \\ y_{i+1} - y_i = q_{\text{ш}} = 0, \end{cases} \quad (22)$$

где $p_{\text{ш}}, q_{\text{ш}}$ – значения параллаксов изображений, полученных в штатном режиме горизонтального полёта БЛА.

Отсюда следует, что если в процессе полёта БЛА в штатном режиме возникает разница параллаксов точек на смежных изображениях, то это свиде-

тельствует о наличии некоординированных отклонений БЛА. Для оценки уровня изменений параллаксов были проведены исследования чувствительности модели к величине угловых отклонений БЛА. Исследования проводились на основе экспериментальных данных (табл.1), сформированных для двух точек 1 и 2 макетных перекрывающихся горизонтальных снимков P_1 и \bar{P}_2 (рис.4). При этом за основу были взяты характеристики цифровой фотокамеры Nikon P700 [15, 16].

Полученные по формулам (20) – (21) оценки суммарного влияния угловых отклонений БЛА на величину изменений $\Delta p, \Delta q$ параллаксов точек перекрывающихся изображений представлены в табл. 2.

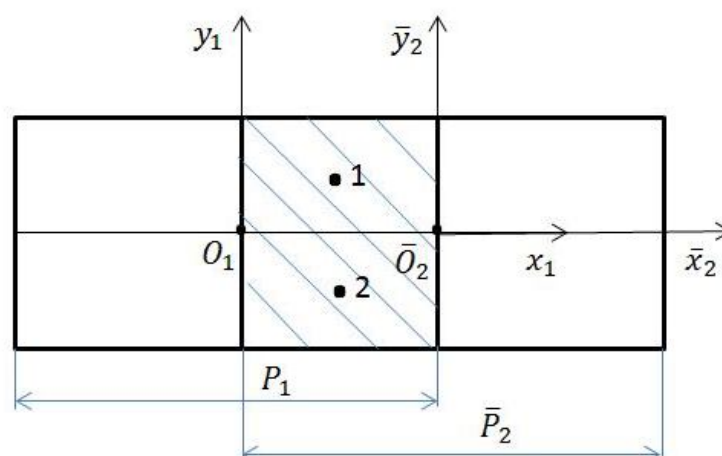
Для определения степени влияния каждого из углов ν, ω, τ на величину изменений $\Delta p_{\nu}, \Delta p_{\tau}, \Delta p_{\omega}, \Delta q_{\nu}, \Delta q_{\tau}, \Delta q_{\omega}$ продольного и поперечного параллаксов в формулах (20) – (21) полагалось, что $\tau = \omega = 0; \nu = \omega = 0; \nu = \tau = 0$. Полученные результаты приведены в табл. 3.

Значения отклонений траектории БЛА по высоте Δh и направлению полёта Δr_c , полученные по формулам (15) – (16), представлены в табл. 4.

Анализ полученных результатов исследования позволяет отметить следующее. При прямолинейном горизонтальном полёте БЛА по заданной траектории продольные параллаксы точек перекрывающихся снимков видеопотока не изменяются, а поперечные – равны нулю.

Таблица 1. Макетные данные**Table 1.** Layout data

Матрица ПЗС / CCD matrix	Параметры / Parameters of		Координаты точек 1 и 2 / Coordi- nates of points 1 and 2
	съёмки / the surveys	снимков / images	
Длина: 8 мм; Ширина: 6 мм; Число пикселей: 3648 на 2736; Размер пикселя: $2,2 \cdot 10^{-6}$ м	Фокусное расстояние фотокамеры: $f=2,4$ мм; Высота съёмки: $H=285$ м; Расстояние $S_1 S_2$: $\Delta r_S=95$ м	$-4 \text{ мм} \leq x_1, \bar{x}_2 \leq 4 \text{ мм};$ $-3 \text{ мм} \leq y_1, \bar{y}_2 \leq 3 \text{ мм};$ Коэффициент перекрытия: 50%; Продольный параллакс: $p_1 = x_1 - \bar{x}_2 = 4 \text{ мм};$ Поперечный параллакс: $q_1 = y_1 - \bar{y}_2 = 0$	$x_1^{(1)} = 2 \text{ мм}$ $y_1^{(1)} = 1,5 \text{ мм}$ $\bar{x}_2^{(1)} = -2 \text{ мм}$ $\bar{y}_2^{(1)} = 1,5 \text{ мм}$ $x_1^{(2)} = 2 \text{ мм}$ $y_1^{(2)} = -1,5 \text{ мм}$ $\bar{x}_2^{(2)} = -2 \text{ мм}$ $\bar{y}_2^{(2)} = -1,5 \text{ мм}$

**Рис. 4.** Макетные снимки**Fig. 4.** Layout shots**Таблица 2.** Оценки влияния угловых отклонений БЛА на изменения параллакса точек перекрывающихся изображений**Table 2.** Estimates of the effect of UAV angular deviations on changes in parallax points of overlapping images

Изменения парал- лакса, точка 1/точка 2, мм / Parallaxe changes, point 1/point 2, mm	Уровень отклонений по углам / Level of angle deviations		
	$v = \tau = \omega$, град / $v = \tau = \omega$, deg.		
	1	3	5
$\Delta p_1 / \Delta p_2$	-0,45/-0,41	-1,4/-1,26	-2,41/-2,17
$\Delta q_1 / \Delta q_2$	-0,48/-0,48	-1,4/-1,41	-2,26/-2,28

Таблица 3. Степень влияния угловых отклонений БЛА на изменения параллаксов точек перекрывающихся изображений**Table 3.** The degree of influence of UAV angular deviations on changes in point parallaxes overlapping images

Изм. парал- лаксов, мм / Parallex changes, mm	Уровень отклонений по углам / Level of angle deviations								
	$\tau=\omega=0$			$\nu=\omega=0$			$\nu=\tau=0$		
	ν , град			τ , град			ω , град		
	1	3	5	1	3	5	1	3	5
Точка 1									
Δp_ν	-0,422	-1,265	-2,109						
Δp_τ				-0,026	-0,081	-0,139			
Δp_ω							0,003	0,009	0,019
Δq_ν	-0,033	-0,096	-0,158						
Δq_τ				-0,035	-0,107	-0,180			
Δq_ω							-0,42	-1,262	-2,103
Точка 2									
Δp_ν	-0,422	-1,265	-2,1089						
Δp_τ				0,026	0,076	0,123			
Δp_ω							-0,002	-0,004	-0,003
Δq_ν	-0,037	-0,113	-0,191						
Δq_τ				-0,035	-0,103	-0,169			
Δq_ω							-0,42	-1,262	-2,103

Таблица 4. Отклонения БЛА по высоте и направлению полёта**Table 4.** UAV deviations in altitude and direction of flight

Отклонения траектории БЛА по высоте и направлению полёта, м / UAV route height and direction of flight deviations, m	Значения отклонений по углам / Values of angle deviations		
	$\nu=\tau=\omega$, град / $\nu=\tau=\omega$, град		
	1	3	5
Δr_h	1,7	5,0	8,3
Δr_c	1,7	5,0	8,3

Возникновение разницы в значениях продольных параллаксов смежных пар снимков и отличия от нуля их поперечных параллаксов может использоваться в качестве критерия возникновения некоординированных отклонений маршрута полёта БЛА от заданной траектории по высоте и направлению полёта.

Если принять величину параллаксов $p_{\text{ш}}, q_{\text{ш}}$ в штатном режиме съёмки за 100%, то при возникновении некоорди-

нированных отклонений по углам тангажа, крена и рыскания степень изменений параллаксов $\Delta p = p_{\text{нш}}/p_{\text{ш}}$ и $\Delta q = q_{\text{нш}}/q_{\text{ш}}$ линейно возрастает и при пяти градусах составляет более 50% (рис. 5). При этом по сравнению с другими углами определяющий вклад (порядка 90%) в уровень изменения продольного параллакса вносят отклонения по углу тангажа, а поперечного – по углу крена (рис. 6).



Рис. 5. Изменения параллаксов при угловых отклонениях БЛА

Fig. 5. Measurements of parallaxes at UAV angular deviations



Рис. 6. Удельный вклад в уровень изменений параллаксов углов v, ω

Fig. 6. Specific contribution of deviations at pitch and roll angles v, ω

Отметим также, что рассматриваемые угловые отклонения в один, три и пять градусов приводят к изменениям траектории по высоте и направлению полёта БЛА соответственно на 1,7, 5,0 и 8,3 м.

Выводы

При прямолинейном горизонтальном полёте беспилотных летательных аппаратов по заданной траектории продольные параллаксы точек перекрывающихся снимков видеопотока не изменяются, а поперечные – равны нулю. Возникновение разницы в значениях продольных параллакс смежных пар снимков и отличия от нуля их поперечных параллакс может использоваться в качестве критерия для автоматического обнаружения некоординированных отклонений маршрута полёта от заданной траектории по высоте и направлению полёта.

Разработанная математическая модель устанавливает функциональную связь параметров отклонений беспи-

лотных летательных аппаратов от заданной траектории и изменений продольного и поперечного параллакс перекрывающихся изображений подстилающей поверхности, обусловленных этими отклонениями, что позволяет её использовать в задачах автоматического обнаружения и оценки величины отклонений от заданной траектории.

Уровень изменений как продольного, так и поперечного параллакса при возникновении некоординированных отклонений по углам тангажа, крена и рыскания имеет один порядок, линейно возрастает с их увеличением и при пяти градусах составляет более 50% от значений параллакс в штатном горизонтальном полёте беспилотных летательных аппаратов.

Определяющий вклад в уровень изменений продольного и поперечного параллакс, составляющий порядка 90%, вносят отклонения беспилотных летательных аппаратов по углам тангажа и крена.

Список литературы

1. Распопов В.Я., Шведов А.П. Решение задачи ориентации для беспилотных летательных аппаратов // Гироскопия и навигация. 2011. № 2. С. 26-27.
2. Andronov V.G., Emelyanov S.G. Autonomous navigation and attitude control of spacecrafts on near-earth circular orbits // Journal of applied engineering science. 2018. Vol.16, № 1. P. 107-110.
3. Kikutis R., Stankūnas J., Rudinskas D. Autonomous unmanned aerial vehicle flight accuracy evaluation for three different path-tracking algorithms // Transport. 2019. № 34(6). P. 652-661.
4. Kinematics and plane decomposition algorithm for non linear path planning navigation and tracking of unmanned aerial vehicles / L. Arulmurugan, S. Raghavendra Prabhu,

M. Ilankumaran, V. Suresh, R. Saravanakumar, R., M. Raghunath // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 995(1). P. 012019. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/995/1/012019/pdf> (дата обращения: 20.11.2021).

5. Review of multi-modal image matching assisted inertial navigation positioning technology for unmanned aerial vehicle / S. Luo, H. Liu, M. Hu, J. Dong // Guofang Keji Daxue Xuebao/Journal of National University of Defense Technology. 2020. Vol. 42. № 6. P. 1-10.

6. Салычев О.С. Автопилот БПЛА с Инерциальной Интегрированной Системой – основа безопасной эксплуатации беспилотных комплексов. URL: http://www.teknol.ru/trash/uav_autopilot_salychev_2602182965.pdf (дата обращения: 24.11.2021).

7. Зинченко О.Н. Беспилотный летательный аппарат: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования. М.: Ракурс, 2011. 12 с.

8. Определение навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения и инерциальных измерений / Д.А. Антонов, М.В. Жарков, И.М. Кузнецов, Е.М. Лунев, А.Н. Пронькин // Труды МАИ. 2016. Вып. № 91. С. 1-26.

9. Андронов В.Г., Емельянов С.Г. Автономное определение элементов внешнего ориентирования космических снимков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2016. № 2(19). С. 77-87.

10. Андронов В.Г., Емельянов С.Г. Метод автономной навигации космических аппаратов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 2(65). С. 65-73.

11. Андронов В.Г., Емельянов С.Г. Астронавигация космических аппаратов на круговых околоземных орбитах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 3(66). С. 34-44.

12. Андронов В.Г. Технология априорной оценки качества космической оптико-электронной съёмки // Известия Юго-Западного государственного университета. 2014. № 3(54). С. 8-12.

13. Андронов В.Г. Априорная оценка качества космической оптико-электронной съёмки // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2014. № 1. С. 36-40.

14. Назаров А.С. Фотограмметрия. Минск: Тетра Системс, 2006. 368 с.

15. Раков Д.Н., Никитин В.Н. Выбор цифрового неметрического фотоаппарата для беспилотного аэрофотосъёмочного комплекса // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. № 7. С. 27-36.

16. Костюк А.С. Особенности аэрофотосъёмки со сверхлёгких беспилотных летательных аппаратов // Омский научный вестник, 2011. № 1 (104). С. 236-240.

17. Гермак О.В. Определение элементов взаимного ориентирования снимков // Наукоеведение: интернет-журнал, 2012. № 4. С. 1-5.
18. Ардентов А. А., Бесчастный И. Ю., Маштаков А. П. [и др.] Алгоритмы вычисления положения и ориентации БПЛА // Программные системы: теория и приложения. 2012. Т. 3. № 3(12). С. 23-38.
19. Hosseini K., Ebadi H., Farnood Ahmadi F. Determining the location of UAVs automatically using aerial or remotely sensed high-resolution images for intelligent navigation of UAVs at the time of disconnection with GPS // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2020. № 48(12). P. 1675-1689. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01187-4>

References

1. Raspopov V.Ya., Shvedov A.P. Reshenie zadachi orientatsii dlya bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Solving the orientation problem for unmanned aerial vehicles]. *Giroskopiya i navigatsiya = Gyroscopy and Navigation*, 2011, no. 2, pp. 26-27.
2. Andronov V.G., Emelyanov S.G. Autonomous navigation and attitude control of spacecrafts on near-earth circular orbits. *Journal of applied engineering science*. 2018, vol.16, no. 1, pp. 107-110.
3. Kikutis R., Stankūnas J., Rudinskas D. Autonomous unmanned aerial vehicle flight accuracy evaluation for three different path-tracking algorithms. *Transport*, 2019, no. 34(6), pp. 652-661.
4. Arulmurugan L., Raghavendra Prabhu S., Ilangkumaran M., Suresh V., Saravanakumar R., R., Raghunath M. Kinematics and plane decomposition algorithm for non linear path planning navigation and tracking of unmanned aerial vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, no. 995(1), pp. 012019. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/995/1/012019/pdf> (accessed: 20.11.2021).
5. Luo S., Liu H., Hu M., Dong J. Review of multi-modal image matching assisted inertial navigation positioning technology for unmanned aerial vehicle. *Guofang Keji Daxue Xuebao/Journal of National University of Defense Technology*, 2020, vol. 42, no. 6, pp. 1-10.
6. Salychev O.S. *Avtopilot BPLA s Inertsial'noi Integrirovannoi Sistemoi – osnova bezopasnoi ekspluatatsii bespilotnykh kompleksov* [UAV autopilot with an Inertial Integrated System is the basis for the safe operation of unmanned complexes]. Available at: http://www.teknol.ru/trash/uav_autopilot_salychev_2602182965.pdf (accessed: 24.11.2021).
7. Zinchenko O.N. *Bespilotnyi letatel'nyi apparat: primeneniye v tselyakh aerofotos"emki dlya kartografirovaniya* [Unmanned aerial vehicle: application for aerial photography for mapping]. Moscow, 2011, 12 p.
8. Antonov D.A., Zharkov M.V., Kuznetsov I.M., Lunev E.M., Pronkin A.N. *Opredele-nie navigatsionnykh parametrov bespilotnogo letatel'nogo apparata na baze fotoizobrazheniya*

i inertsiyal'nykh izmerenii [Determination of navigation parameters of an unmanned aerial vehicle based on photographic images and inertial measurements]. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*, 2016, is. № 91, pp. 1-26.

9. Andronov V.G., Yemelyanov S.G. Avtonomnoe opredelenie elementov vneshnego orientirovaniya kosmicheskikh snimkov [Autonomous determination of elements of external orientation of satellite images]. *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*, 2016, no. 2(19), pp. 77-87.

10. Andronov V.G., Emelyanov S.G. Metod avtonomnoi navigatsii kosmicheskikh apparatov [Method of autonomous navigation of spacecraft]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no. 2(65), pp. 65-73.

11. Andronov V.G., Emelyanov S.G. Astronavigatsiya kosmicheskikh apparatov na krugovykh okolozemnykh orbitakh [Astronavigation of spacecraft in circular near-Earth orbits]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no. 3(66), pp. 34-44.

12. Andronov V.G. Tekhnologiya apriornoi otsenki kachestva kosmicheskoi optiko-elektronnoi s'emki [Technology of a priori assessment of the quality of space optical-electronic survey]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, no. 3(54), 2014, pp. 8-12.

13. Andronov V.G. Apriornaya otsenka kachestva kosmicheskoi optiko-elektronnoi s'emki [A priori assessment of the quality of space optical-electronic survey]. *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*, no. 1, 2014, pp. 36-40.

14. Nazarov A.S. *Fotogrammetriya* [Photogrammetry]. Minsk, TetraSystems Publ., 2006. 368 p.

15. Rakov D.N., Nikitin V.N. Vybór tsifrovogo nemetricheskogo fotoapparata dlya bespilotnogo aerofotos"emoch'nogo kompleksa [The choice of a digital non-metric camera for an unmanned aerial photography complex]. *Interexpo Geo-Siberia*, 2012, no. 7, pp. 27-36.

16. Kostyuk A.S. Osobennosti aerofotos"emki so sverkhlegkikh bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Features of aerial photography from ultralight unmanned aerial vehicles]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2011, no. 1 (104), pp. 236-240.

17. Germak O.V. Opredelenie elementov vzaimnogo orientirovaniya snimkov [Determination of elements of mutual orientation of images]. *Naukovedenie = Science Studies*, 2012, no. 4, pp. 1-5.

18. Ardentov A. A., Beschastny I. Y., Mashtakov A. P. [etc.] Algoritmy vychisleniya polozheniya i orientatsii BPLA [Algorithms for calculating the position and orientation of the UAV]. *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya = Software systems: theory and applications*, 2012, vol. 3, no. 3(12), pp. 23-38.

19. Hosseini K., Ebadi H., Farnood Ahmadi F. Determining the location of UAVs automatically using aerial or remotely sensed high-resolution images for intelligent navigation of UAVs at the time of disconnection with GPS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2020, no. 48(12), pp. 1675-1689. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01187-4>

Информация об авторах / Information about the Authors

Андронов Владимир Германович, доктор технических наук, заведующий кафедрой Космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vladia58@mail.ru

Vladimir G. Andronov, Dr. of Sci. (Engineering), Head of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vladia58@mail.ru

Чуев Андрей Алексеевич, аспирант кафедры Космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kpiss-swsu@yandex.ru

Andrey A. Chuev, Post-Graduate Student Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kpiss-swsu@yandex.ru

Князев Александр Александрович, студент кафедры Космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: 163497.12@mail.ru

Alexander A. Knyazev, Student, Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: 163497.12@mail.ru

Система управления интеллектуальным светофором на основе нечеткой логики

М. В. Бобырь¹ ✉, Н. И. Храпова¹, М. А. Ламонов¹

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

✉ e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка системы управления интеллектуальным светофором на основе нечеткой логики с возможностью корректировки временных интервалов сигналов светофора в зависимости от дорожной ситуации.

Методы. Определение входных переменных для нечеткой логической системы управления интеллектуальным светофором выполняется с помощью системы технического зрения. Предложенный способ управления устройством регулирования дорожным движением основан на системе нечеткого вывода и содержит несколько этапов: определение четких входных переменных, фаззификация значений входных переменных, агрегирование данных на основе нечетких правил, дефаззификация значений и определение времени задержки разрешающего сигнала светофора.

Результаты. По предложенной нечеткой модели разработано устройство, имитирующее работу системы управления интеллектуальным светофором. Устройство собрано на базе контроллера Arduino Uno. Создана специализированная программная модель, которая была запатентована. Номер свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для регулирования светофора на основе нечеткой логики» – 2021661796.

Заключение. Результаты экспериментальных исследований показали высокую эффективность работы интеллектуального светофора в суточном цикле. Программа успешно справляется с оценкой плотности потока автомобилей и пешеходов, пропорционально регулируя время работы ламп светофора. Доказано, что внедрение разработанной системы управления интеллектуальным светофором позволяет обеспечить безопасность и удобство дорожного движения для всех участников.

Ключевые слова: нечеткая логика, нечеткая система вывода, система управления интеллектуальным светофором.

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

Для цитирования: Бобырь М. В., Храпова Н. И., Ламонов М. А. Система управления интеллектуальным светофором на основе нечеткой логики // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 162-176. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-162-176>.

Поступила в редакцию 23.09.2021

Подписана в печать 08.10.2021

Опубликована 20.12.2021

Smart Traffic Light Control System Based on Fuzzy Logic

Maxim V. Bobyr¹ ✉, Natalia I. Khrapova¹, Maxim A. Lamonov¹

² Southwest State University

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

✉ e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Abstract

Purpose of research. Development of a smart traffic light control system based on fuzzy logic with the ability to adjust the time intervals of traffic light signals depending on the traffic situation.

Methods. The definition of input variables for a fuzzy logic control system of smart traffic lights is performed using a vision system. The proposed method of controlling a traffic control device is based on a fuzzy inference system and contains several stages: determination of clear input variables, fuzzification of the values of input variables, aggregation of data based on fuzzy rules, defuzzification of values and determination of the delay time of the permitting traffic light signal.

Results. According to the proposed fuzzy model, a device that simulates the operation of a smart traffic light control system was developed. The device is assembled on the basis of the Arduino Uno controller. The developed specialized software model was patented. The number of the certificate of state registration of the computer program "Software for traffic light control based on fuzzy logic" is 2021661796.

Conclusion. The results of experimental studies show the high efficiency of the smart traffic lights in a daily cycle. The program successfully copes with the assessment of the traffic density of cars and pedestrians, adjusting the operating time of traffic lights proportionally. It is proved that the implementation of the developed smart traffic light control system makes it possible to ensure the safety and convenience of road traffic for all road users.

Keywords: fuzzy logic, fuzzy output system, intelligent traffic light control system.

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

For citation: Bobyr M.V., Khrapova N. I., Lamonov M. A. Smart Traffic Light Control System Based on Fuzzy Logic. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 162-176 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-162-176>.

Received 23.09.2021

Accepted 08.10.2021

Published 20.12.2021

Введение

Светофор – оптическое устройство, подающее световые сигналы для регулирования движения всех видов транспорта и пешеходов. За годы своего существования устройство претерпело множество изменений, однако цвета сигналов предшественника используются и в современных моделях¹ [1].

Большинство светофоров работают по фиксированному циклу, при котором каждая фаза регулирования повторяется через определенный промежуток времени. Этот стиль работы прост, однако он оказывается неэффективным при интенсивном движении. Более совершенной альтернативой является разработка интеллектуального светофора на основе нечеткой логики [2].

Прототип интеллектуального светофора появился в конце 1920 годов. На перекрестке был установлен детектор

¹ ГОСТ Р 50597-93. Автомобильные дороги и улицы требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. М., 1993.

для получения данных о дорожном движении [3,4]. Полученная информация передавалась на светофор, который загорался «красным» светом только в том случае, когда на второстепенной дороге приближался автомобиль.

Приложения с нечеткой логикой для управления светофорами используются с 1970 годов. Преимуществом нечеткой логики является ее способность моделировать процесс принятия решения человеком и выдавать приближенные решения в случаях, когда описание математическими методами невозможно [5-8].

В работе [9] целью исследования являлась разработка системы интеллектуального контроллера для управления светофором. Был проведен сравнительный анализ работы обычного светофора и разработанного устройства. В ходе эксперимента ученые выяснили, что контроллер с нечеткой логикой успешно адаптируется в соответствии с плотностью движения и значительно сокращает время ожидания разрешающего сигнала. Недостатки работы [9] заключаются в том, что для каждой составляющей цвета «Green, Red, Orange» создана отдельная база нечетких правил, что увеличивает время работы нечеткой системы. Кроме того для всех светофоров предусмотрены индивидуальные микроконтроллеры, что также приводит к снижению производительности вычислительной системы. В работе [10] исследования направлены на получение

минимального времени ожидания зеленого сигнала. Параметры нечеткого регулятора определялись с помощью алгоритма обучения с подкреплением. Однако для подобного вида обучения необходимо время и это снижает эффективность работы данной системы. В работе [11] эксперименты проводились для нескольких вариантов транспортных развязок. На определенном расстоянии были установлены детекторы для получения информации о транспортном потоке. Входными данными являлась максимальная длина пробки в соответствующем направлении. Недостатком работы [11] являются нечеткие правила, созданные для каждой составляющей цвета, что увеличивает их количество и снижает производительность системы.

Предложенная нами модель интеллектуального светофора следит за плотностью транспортного и пешеходного потока и подстраивается под дорожную ситуацию. Учитывая введенное значение количества машин и людей на перекрестке, программа варьирует значение времени на каждую фазу мигания ламп интеллектуального светофора, благодаря чему длительность зеленого сигнала увеличивается на наиболее загруженном направлении.

Внедрение таких систем на улицах городов решает основные транспортные проблемы, такие как пробки, аварийность, повышает безопасность дорожного движения, а также увеличивает среднюю скорость городского потока.

Материалы и методы

Разработанная нечеткая логическая система управления интеллектуальным светофором предусмотрена для перекрестка с пешеходным переходом [12-14]. В системе имеются две входные переменные: количество автомобилей и количество пешеходов, которые опре-

деляются с помощью системы технического зрения [15]. Нечеткой выходной переменной является время, на которое необходимо увеличить продолжительность работы разрешающего сигнала светофора.

На рис. 1 представлена схема перекрестка с применением интеллектуальных светофоров.

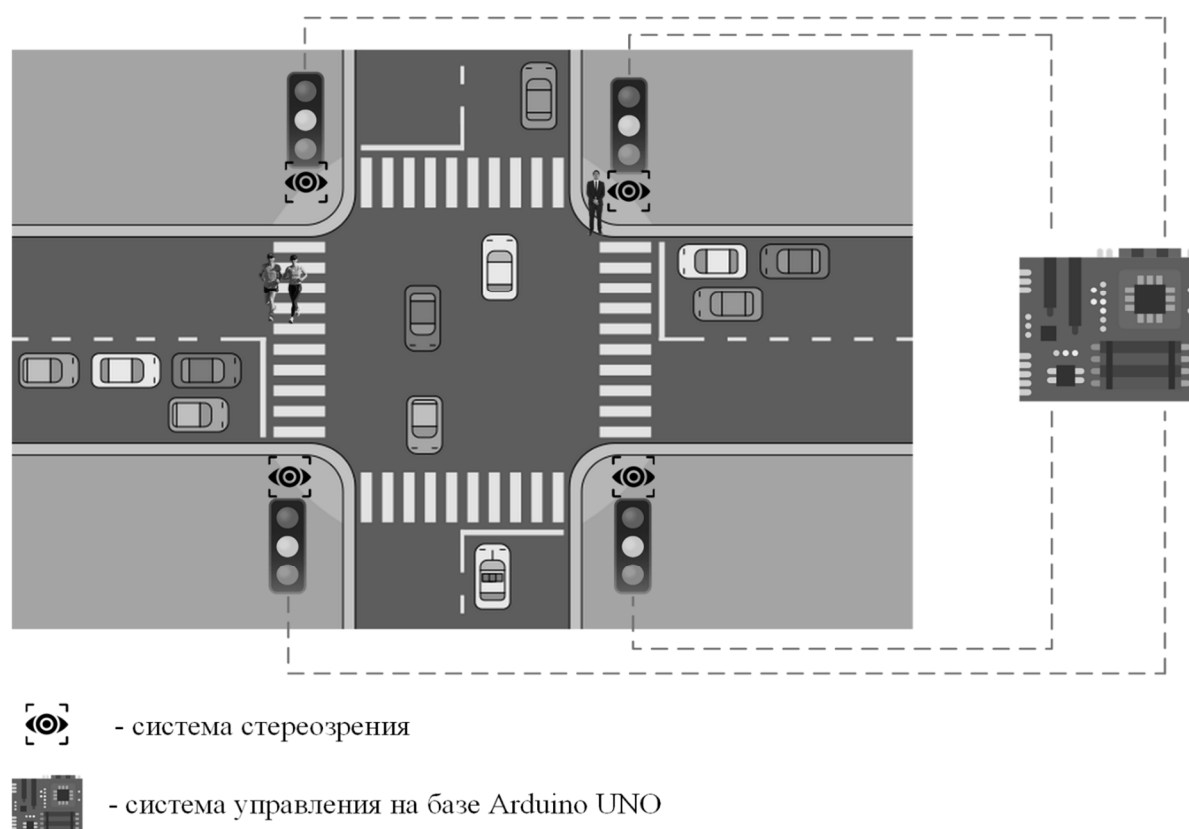


Рис. 1. Схема перекрёстка с применением интеллектуальных светофоров

Fig. 1. The diagram of the intersection with smart traffic lights

Процесс управления транспортным потоком разделен на шаги, соответствующие одному циклу программы. Каждый шаг включает в себя следующие этапы:

1. Определение четких входных переменных.
2. Фаззификация значений входных переменных.

3. Выборка решений на основе лингвистических переменных и ряда нечетких правил¹.

4. Дефаззификация значений [16-18].

¹ Спицын В.Г. Разработка экспертных систем на основе нечетких правил вывода: методические указания к лабораторным работам. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. С 33.

5. Определение времени задержки разрешающего сигнала светофора.

Рассмотрим математическую модель нечеткой логической системы управления интеллектуальным светофором.

Шаг 1. Построение функций принадлежности нечеткой системы и расчет степеней функции принадлежности. Расчет выполняется по формуле.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \notin [a; c]; \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{если } x \in [a; b]; \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{если } x \in [b; c], \end{cases} \quad (1)$$

где $\mu(x)$ – характеристическая функция принадлежности; a, b, c – вершины соответствующего треугольника (рис. 2).

Шаг 2. Расчет степеней истинности предпосылок нечетких правил происходит с учетом базы нечетких правил (табл. 1) и по формуле (2).

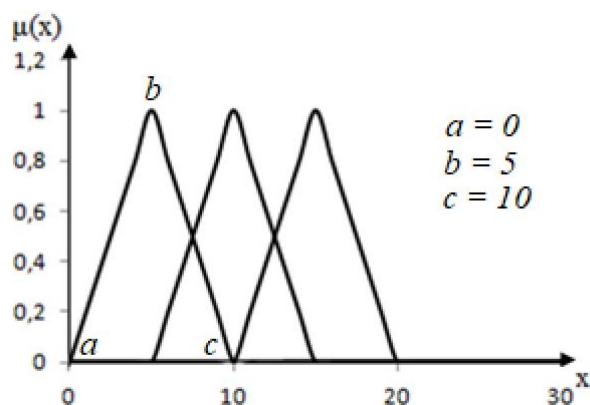


Рис. 2. График функции принадлежности входной переменной

Fig. 2. Graph of the membership function of the input variable

Таблица 1. База нечетких правил

Table 1. Fuzzy rule base

	B ₁	B ₂	B ₃
A ₁	Y ₃	Y ₄	Y ₅
A ₂	Y ₄	Y ₃	Y ₄
A ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃

Расчет 9 степеней истинности осуществляется следующим образом:

$$\begin{aligned} R1 &= \theta_t(A_1; B_1) - \text{для } Y_3; \\ R2 &= \theta_t(A_1; B_2) - \text{для } Y_4; \\ R3 &= \theta_t(A_1; B_3) - \text{для } Y_5; \\ R4 &= \theta_t(A_2; B_1) - \text{для } Y_2; \\ R5 &= \theta_t(A_2; B_2) - \text{для } Y_3; \\ R6 &= \theta_t(A_2; B_3) - \text{для } Y_4; \\ R7 &= \theta_t(A_3; B_1) - \text{для } Y_1; \\ R8 &= \theta_t(A_3; B_2) - \text{для } Y_2; \\ R9 &= \theta_t(A_3; B_3) - \text{для } Y_3, \end{aligned} \quad (2)$$

где θ_t – знак, обозначающий операцию нечеткой импликации с использованием одной из t-норм [19].

Шаг 3. Усечение функций принадлежности в зависимости от нечетких правил. Расчет выполняется по формуле:

$$\begin{aligned} Y_5 &= R_3; \\ Y_4 &= \theta_s(R_2; R_6); \\ Y_3 &= \theta_s(R_1; \max(R_5; R_9)); \\ Y_2 &= \theta_s(R_8; R_4); \\ Y_1 &= R_7, \end{aligned} \quad (3)$$

где θ_s – знак, обозначающий операцию нечеткой импликации с использованием одной из s-норм [19].

Шаг 4. Метки и дефаззификация. Вычисление значения дефаззификации четкого значения выполняется по методу упрощенного центра тяжести [20].

Пусть метки выходной функции принадлежности задаются синглтонной функцией принадлежности и равны $M_1=2000$, $M_2=3000$, $M_3=4000$, $M_4=5000$, $M_5=6000$ (рис. 4).

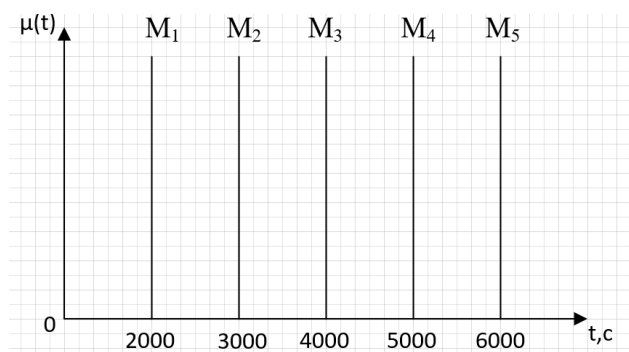


Рис. 3. Метки выходной функции принадлежности

Fig. 3. Labels of the output membership function

Дефазгификация выходной переменной осуществляется на основе формулы:

$$t_{\text{delay}} = \frac{\sum_{i=1}^{11} M_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^{11} Y_i}, \quad (4)$$

где M_i – метки выходной функции принадлежности.

Шаг 5. Время регулирования сигналов интеллектуального светофора (формула (5)):

$$t_{\text{per}} = t_{\text{уст}} + t_{\text{delay}}, \quad (5)$$

где $t_{\text{уст}} = 10$ с.

Для реализации устройства интеллектуального светофора использовались микроконтроллер Arduino Uno, кабель USB, макетная плата, провода, резисторы, светодиоды красного, зеленого и желтого цветов [21-23].

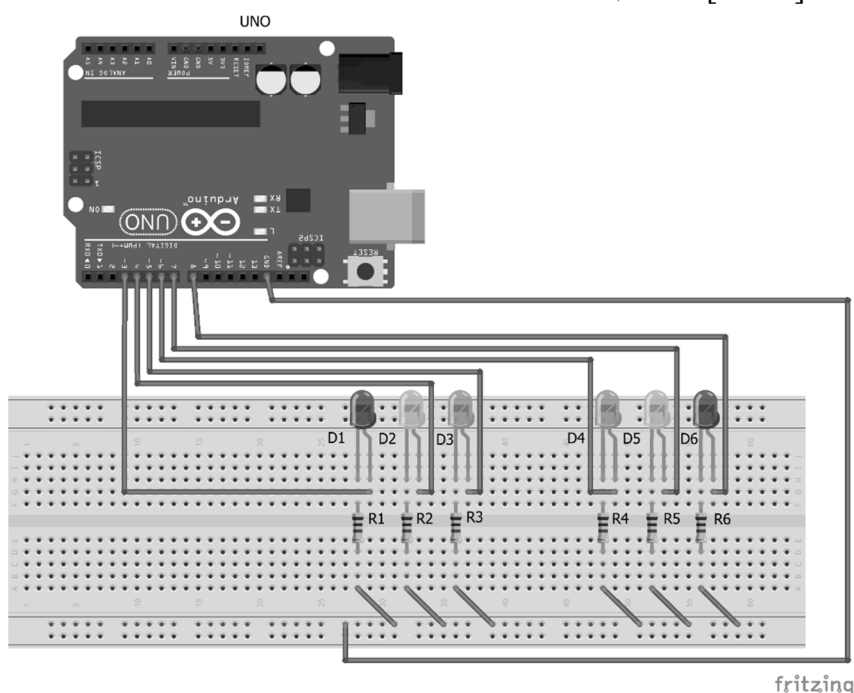


Рис. 4. Схема устройства интеллектуального светофора, где **UNO** – микроконтроллер Arduino UNO; **D1, D6** – красные светодиоды; **D2, D5** – желтые светодиоды; **D3, D4** – зеленые светодиоды; **R1-6** – резисторы номиналом 220 Ом

Fig. 4. Structure diagram of the smart traffic light, where **UNO** is the microcontroller Arduino UNO; **D1, D6** are red LEDs; **D2, D5** are yellow LEDs; **D3, D4** are green LEDs; **R1-6** are 220 Ohm resistors

Схема подключения светодиодов к Arduino Uno, имитирующих работу ламп светофора, представлена на рис. 5.

Светодиоды подключаются от управляющих сигналов микроконтроллера через резисторы к земле. Резистор используется в качестве токоограничения. Так как напряжение с выходов 3-4 Arduino Uno (рис. 5) составляет 5В и ток, при котором горят светодиоды, равен 20-40 мА, то по закону Ома сопротивление на схеме должно находиться в диапазоне от 150 Ом до 250 Ом. Выбираем стандартное сопротивление $R=220\text{Ом}$ и используем его в схеме. Подключение выходных сигналов с микроконтроллера приведено в табл. 1.

Общая схема работы интеллектуального светофора состоит из 2 основных и 2 промежуточных режимов регулирования. Первый режим предполагает, что на светофоре 1 горит лампа красного света, а на светофоре 2 – зеленый свет. Второй режим является промежуточным перед сменой сигналов устройства. При этом к лампам, горящим в режиме 1, добавляется мигающий желтый свет. Происходит пять ко-

ротких включений сигнала жёлтого цвета, после чего устройства переходят в 3 режим. Режим 3 полностью противоположен режиму 1. В 4 режиме происходит переход на режим 1, после чего цикл возобновляется.

Схема работы светофора сведена в табл. 2.

На рис. 6 приведены примеры работы режимов 1-4 на макете «Интеллектуальный светофор».

Результаты моделирования работы устройства интеллектуального светофора представлены в разделе «Результаты и их обсуждение».

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим результаты моделирования системы управления интеллектуальным светофором на приведенном ниже примере.

Пусть на перекрестке находятся 11 машин ($\text{car} = 11$) и 9 пешеходов ($\text{pedestrian} = 9$). Выполним расчеты для введенных данных.

Рассмотрим функции принадлежности нечеткой системы для автомобилей и пешеходов:

Таблица 2. Подключение выходных сигналов

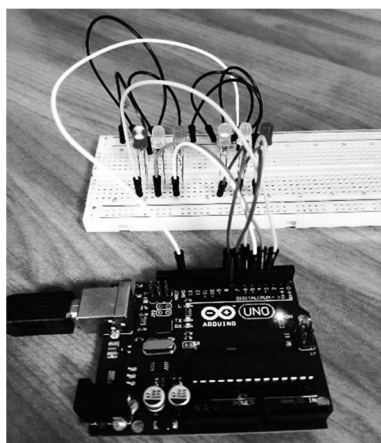
Table 2. Connection of output signals

Обозначение светодиода / Light-emitting diode	Светофор 1 / Traffic lights 1			Светофор 2 / Traffic lights 2		
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Цвет / Colour	красный	желтый	зеленый	зеленый	желтый	красный

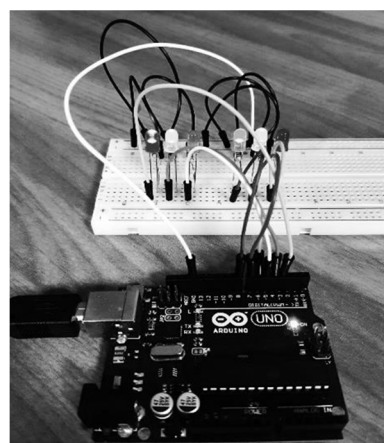
Таблица 3. Схема работы светофора

Table 3. Traffic light operation scheme

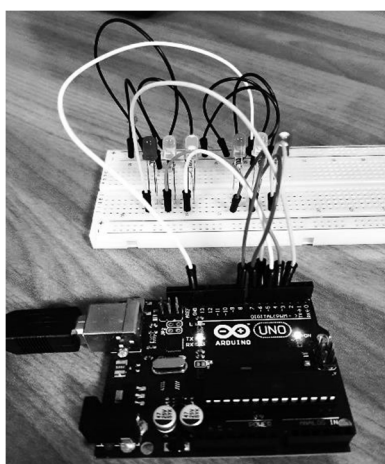
Подключение / Connection	Светофор 1 / Traffic lights 1			Светофор 2 / Traffic lights 2		
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Режимы / Modes	красный / red	желтый / yellow	зеленый / green	зеленый / green	желтый / yellow	красный / red
1 режим / mode 1	1	0	0	1	0	0
2 режим / mode 2	1	1/0 10 тактов	0	1	1/0 10 тактов	0
3 режим / mode 3	0	0	1	0	0	1
4 режим / mode 4	0	1/0 10 тактов	1	0	1/0 10 тактов	1



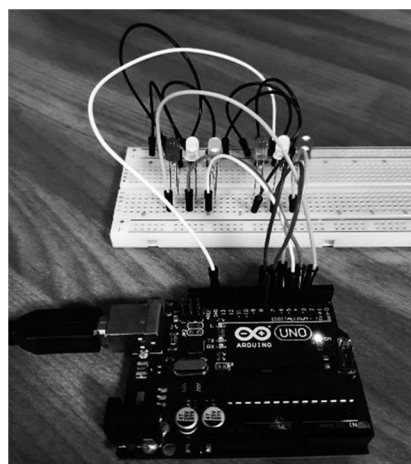
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Режимы работы светофоров: а – первый режим; б – второй режим; в – третий режим; г – четвертый режим

Fig. 5. Traffic light operating modes: а – the first mode; б – the second mode; в – the third mode; г – the fourth mode

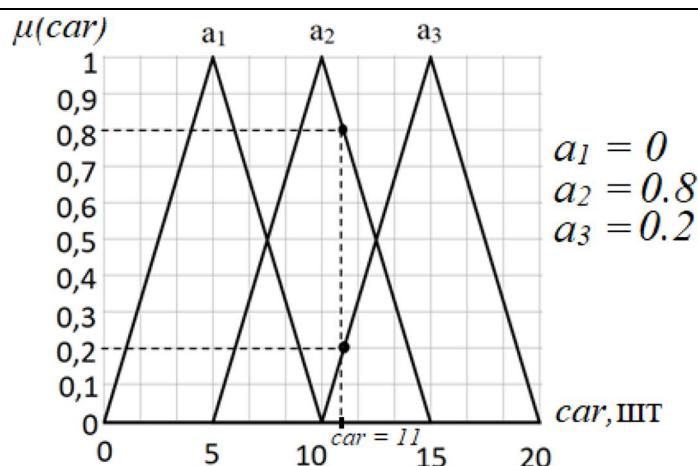


Рис. 6. График функции принадлежности входной и выходной переменной «Автомобили»

Fig. 6. Diagram of the membership function of the input and output variable "Cars"

Рассчитаем степени принадлежности нечеткого множества для введенного значения автомобилей и пешеходов по формуле (1). Полученные значения приведены на рис. 6 и 7 соответственно.

Рассчитаем степени истинности предпосылок нечетких правил с учетом формулы (2):

$$R1 = \theta_t(0; 0,2) = 0 \text{ — для } Y_3 ;$$

$$R2 = \theta_t(0; 0,8) = 0 \text{ — для } Y_4 ;$$

$$R3 = \theta_t(0; 0) = 0 \text{ — для } Y_5 ;$$

$$R4 = \theta_t(0,8; 0,2) = 0,2 \text{ — для } Y_2 ;$$

$$R5 = \theta_t(0,8; 0,8) = 0,8 \text{ — для } Y_3 ;$$

$$R6 = \theta_t(0,8; 0) = 0 \text{ — для } Y_4 ;$$

$$R7 = \theta_t(0,2; 0,2) = 0,2 \text{ — для } Y_1 ;$$

$$R8 = \theta_t(0,2; 0,8) = 0,2 \text{ — для } Y_2 ;$$

$$R9 = \theta_t(0,2; 0) = 0 \text{ — для } Y_3 .$$

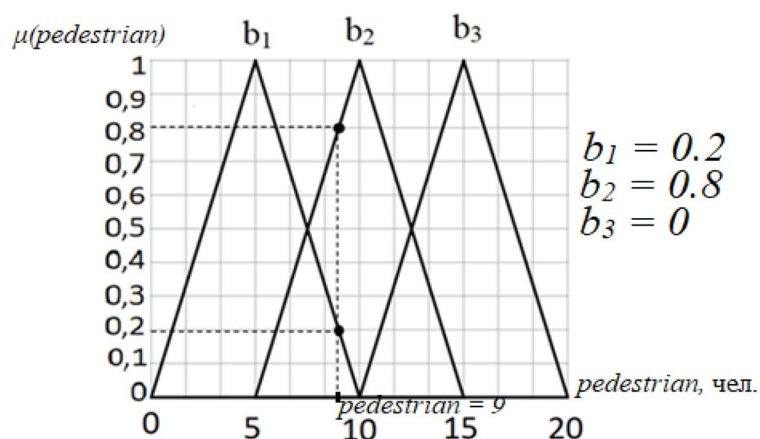


Рис. 7. График функции принадлежности входной и выходной переменной «Пешеходы»

Fig. 7. Diagram of the membership function of the input and output variable "Pedestrians"

Выполним усечение функций принадлежности в зависимости от нечетких правил по формуле (3):

$$Y_5 = R_3 = 0;$$

$$Y_4 = \theta_s(0; 0) = 0;$$

$$Y_3 = \theta_s(0; 0,8; 0) = 0,8;$$

$$Y_2 = \theta_s(0,2; 0,2) = 0,2;$$

$$Y_1 = R_7 = 0,2.$$

Выполним расчет дефаззификации по формуле (4):

$$t_{\text{delay}} = \frac{(Y_1 * M_1) + (Y_2 * M_2) + (Y_3 * M_3) + (Y_4 * M_4) + (Y_5 * M_5)}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5} =$$

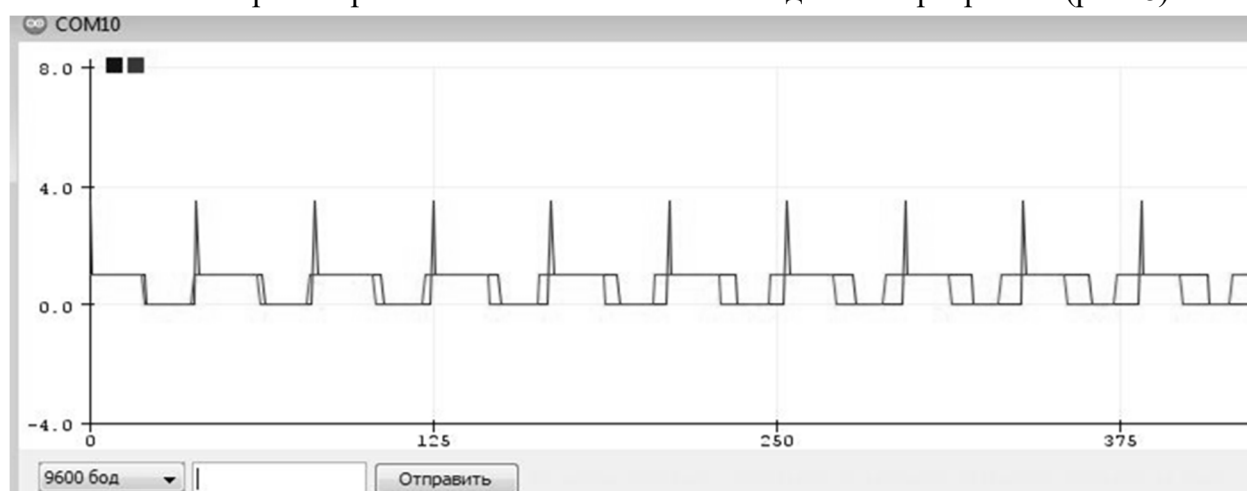
$$= \frac{(0,2 * 2000) + (0,2 * 3000) + (0,8 * 4000) + (0 * 5000) + (0 * 6000)}{0,2 + 0,2 + 0,8 + 0 + 0} = 3,5 \text{ сек.}$$

Выполним расчет времени регулирования сигналов интеллектуального светофора по формуле (5):

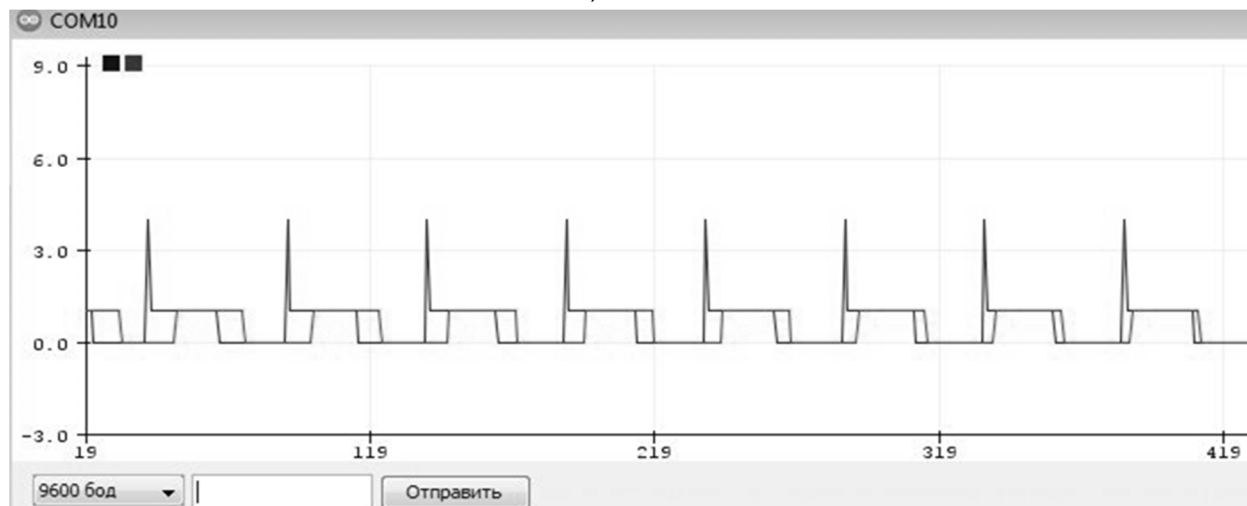
$$t_{\text{per}} = 10 + 3,5 = 13,5 \text{ сек.}$$

Было проведено 4 экспериментальных моделирования, в которых менялись значения транспортного и пеше-

ходного потока. Моделирование проводилось с помощью функции Serial Plotter в Arduino IDE. Полученные диаграммы показывают время задержки сигналов светофора в зависимости от данных о количестве автомобилей и пешеходов на перекрестке (рис. 8).



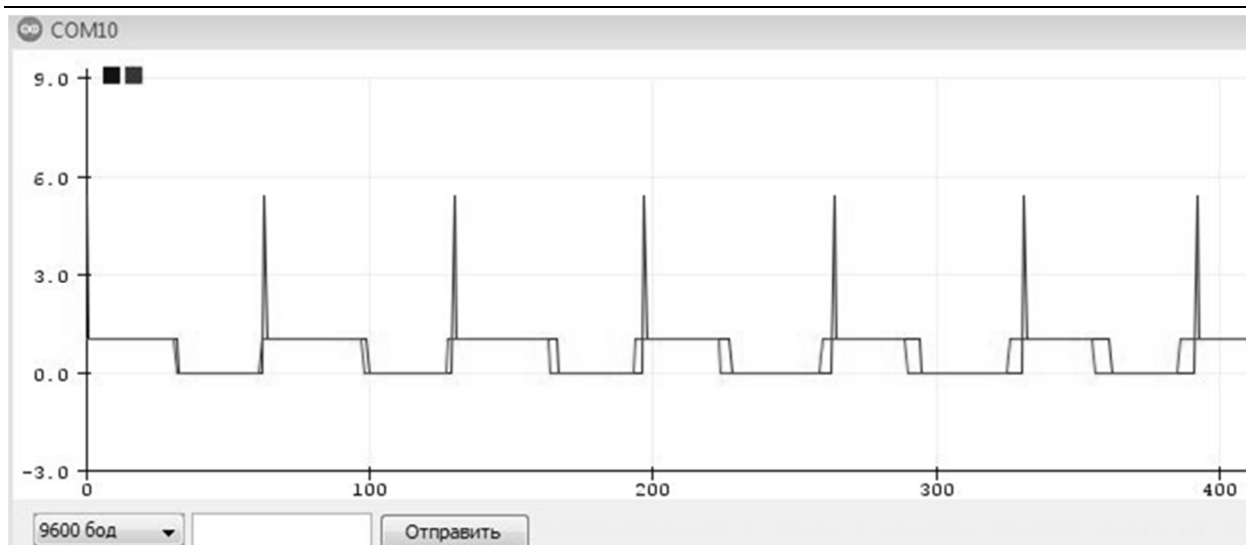
а)



б)

Рис. 8. Диаграммы изменения времени задержки сигналов светофора в зависимости от количества автомобилей и пешеходов на перекрестке: **а** – car = 11, pedestrian = 9; **б** – car = 1, pedestrian = 1 (окончание на с. 172)

Fig. 8. Diagrams of changes of traffic light signals delay time according to the number of cars and pedestrians at the crossroad, where **а** – car = 11, pedestrian = 9; **б** – car = 1, pedestrian = 1; (ending at p. 172)



в)



г)

Рис. 8. Диаграммы изменения времени задержки сигналов светофора в зависимости от количества автомобилей и пешеходов на перекрестке: **в** – car = 5, pedestrian = 12; **г** – car = 7, pedestrian = 3 (начало с. 171)

Fig. 8. Diagrams of changes of traffic light signals delay time according to the number of cars and pedestrians at the crossroad, where **в** – car = 5, pedestrian = 12; **г** – car = 7, pedestrian = 33 (beginning at 171 p.)

Моделирование диаграммы (а) проводилось для ситуации, когда на перекрестке находятся 11 машин и 9 пешеходов. Время задержки сигналов светофора при этом равно 3,5 сек. Диаграмма (б) отражает ситуацию, когда на перекрестке находится 1 пешеход и 1 автомо-

биль. Время задержки сигнала – 4 сек. Диаграмма (в) смоделирована для значений 5-12, время задержки – 5,4 сек. Моделирование диаграммы (г) проводилось для 7 машин и 3 пешеходов. Время задержки сигналов светофора равно 3,6 сек.

Проведенные экспериментальные исследования доказывают высокую эффективность работы интеллектуального светофора в суточном режиме. Программа успешно справилась с оценкой плотности пешеходного и транспортного потоков и регулированием времени задержки сигналов интеллектуального светофора.

Выводы

В представленной работе разработана система управления интеллектуальным светофором, в которую адаптирована модель нечеткой логической системы для автоматизации корректировки временных интервалов световых сигналов светофора в зависимости от интенсивности транспортного и пешеходного потоков.

Список литературы

1. Яковенко Н.Ю., Ясенюк С.Н., Нежелченко Е.В. Управление транспортными потоками. Белгород: Изд-во БелГАУ им. В.Я. Горина, 2020. 82 с.
2. Бобырь М.В., Милостная Н.А. Анализ использования мягких арифметических операций в структуре нечетко-логического вывода // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 7 (133). С. 7-15.
3. Бачманов М.Д. Опыт применения современных детекторов транспорта в задачах управления транспортным потоком // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура: журнал электронный. 2014. №2(2) декабрь.
4. Евстигнеев И.А. Основы создания интеллектуальных транспортных систем на автомобильных дорогах федерального значения России. М.: изд-во «Перо», 2016. 260 с.
5. Бобырь М.В., Кулабухов С.А. Моделирование процесса управления температурным режимом в зоне резания на основе нечеткой логики // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 3. С. 76-82.
6. Киселёва Э.А., Краева А.А., Савинова Ю.С. Обзор нечеткой логики в управлении // Integral: Международный журнал прикладных наук и технологий. 2019. Т. 3
7. Bobyr M.V., Yakushev A.S., Dorodnykh A.A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2020, 152, 107378. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107378>
8. Bobyr M.V., Emelyanov S.G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems // Applied Soft Computing. 2020. Т. 88. С. 106030.
9. Cihan Karakuzu, Osman Demirci, Fuzzy logic based smart traffic light simulator design and hardware Implementation // Applied Soft Computing. 2010. № 10. P. 66–73.
10. Ella Bingham. Reinforcement learning in neurofuzzy traffic signal control // European Journal of Operational Research. 2001. №131. P. 232–241.
11. C.-H. Chou, J.-C. Teng, A fuzzy logic controller for traffic junction signals // Information Sciences. 2002. №143. P. 73–97.

12. Титов В.С., Бобырь М.В., Милостная Н.А. АСУ прогнозированием точности обработки деталей // Автоматизация в промышленности. 2008. № 4. С. 3-4.
13. Усков А.А. Системы с нечеткими моделями объектов управления. Смоленск: СФРУК, 2013. 153 с.
14. Патент на полезную модель RU 27868 U1. Система автоматического управления следящими приводами оборудования с ЧПУ. 20.02.2003. Заявка № 2001129226/20 от 29.10.2001 / Титов В.С., Беседин А.В., Бобырь М.В.
15. Гридин В.Н., Титов В.С., Труфанов М.И. Адаптивные системы технического зрения. М.: Наука, 2009.
16. Бобырь М.В., Кулабухов С.А. Математическая модель для нового метода Дефаззификации в структуре нечеткого вывода // Мехатроника, автоматика и робототехника: сборник научных трудов международной научно-практической конференции. Новокузнецк, 2018. С. 218-220.
17. Бобырь М.В., С.А. Кулабухов Дефаззификация вывода из базы нечетких правил на основе метода разности площадей // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. №9. С.32– 41.
18. Leekwijck W.V., Kerre E.E. Defuzzification: criteria and classification // Fuzzy Sets Syst. 1999. № 108. P. 159–178.
19. Piegat A. Fuzzy modelling and control. Physica-Verlag. Heidelberg. 2001. doi:10.1007/978-3-7908-1824-6
20. Vuong, P. T., Madni, A. M., Vuong, J. B. VHDL implementation for a fuzzy logic controller. In 2006 World Automation Congress, WAC'06. IEEE Computer Society (2006)
21. Arduino.ru: Официальный сайт Arduino в России [Электронный ресурс]. Загл. с экрана. URL: <http://arduino.ru/>, свободный.
22. Collotta M., Bello L.L., Pau G. A novel approach for dynamic traffic lights management based on Wireless Sensor Networks and multiple fuzzy logic controllers. Elsevier: Expert Systems with Applications. March 2015. P. 5403- 5415.
24. Olanrewaju O. M, Obiniyi A.A., Junaidy S. B. Fuzzy Logic Concept For Safety Driven Vehicle Pedestrian Traffic Interaction // International Journal of Computer Application (0995-8887). June 2017. Vol. 167. №1.

References

1. Yakovenko N.Y., Yasenok S.N., Nezhelchenko E.V. *Upravlenie transportnymi potokami* [Traffic flow management]. Belgorod, 2020. 82 p.
2. Bobyr M.V., Milostnaya N.A. Analiz ispol'zovaniya myagkikh arifmeticheskikh operatsii v strukture nechetko-logicheskogo vyvoda [Analysis of the use of soft arithmetic operations in the structure of fuzzy logic inference]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Bulletin of Computer and Information Technologies*, 2015, no. 7 (133), pp. 7-15.

3. Bachmanov M.D. Opyt primeneniya sovremennykh detektorov transporta v zadachakh upravleniya transportnym potokom [The experience of using modern transport detectors in traffic flow control tasks]. *Zhurnal elektronnyi. «Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura» = Electronic journal. The car. Road. Infrastructure*, 2014, no.2(2) December.

4. Evstigneev I.A. *Osnovy sozdaniya intellektual'nykh transportnykh sistem na avtomobil'nykh dorogakh federal'nogo znacheniya Rossii* [Fundamentals of creating intelligent transport systems on highways of federal significance of Russia]. Moscow, Pero Publ., 2016, 260 p.

5. Bobyr M.V., Kulabukhov S.A. Modelirovanie protsessa upravleniya temperaturnym rezhimom v zone rezaniya na osnove nechetkoi logiki [Modeling of the process of controlling the temperature regime in the cutting zone based on fuzzy logic]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin = Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*, 2017, no. 3, pp. 76-82/

6. Kiseleva E.A., A Kraeva.A., Savinova Y.S. Obzor nechetkoi logiki v upravlenii [Review of fuzzy logic in management]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh nauk i tekhnologii «Integral» = International Journal of Applied Sciences and Technologies "Integral"*, 2019, vol. 3.

7. Bobyr M.V., Yakushev A.S., Dorodnykh A. A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of a CNC machine, implemented on FPGA. *Measurement: Journal of the International Confederation of Measurements*, 2020, 152, 107378. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107378>

8. Bobyr M.V., Emelyanov S.G. Nonlinear method of training neuro-fuzzy models for dynamic control systems. *Applied soft computing*, 2020, vol. 88, pp. 106030.

9. Chihan Karakuzu, Osman Demirci. Development and hardware implementation of an intelligent traffic light simulator based on fuzzy logic. *Applied soft computing* 2010, no. 10, pp. 66-73.

10. Ella Bingham, Reinforcement learning in the management of neurofusion traffic signals. *European Journal of Operational Research*, 2001, no. 131, pp. 232-241.

11. Chou C.-H., Teng J.-S. Fuzzy logic controller for traffic interchange signals. *Information Sciences*, 2002, no. 143, pp. 73-97.

12. Titov V.S., Bobyr M.V., Milostnaya N.A. ASU prognozirovaniem tochnosti obrabotki detalei [Automated control system predicting the accuracy of machining parts]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in Industry*, 2008, no. 4, pp. 3-4.

13. Uskov A.A. *Sistemy s nechetkimi modelyami ob"ektov upravleniya* [Systems with fuzzy models of control objects]. Smolensk, SFRUK Publ., 2013. 153 p.

14. Titov V.S., Besedin A.V., Bobyr M.V. *Sistema avtomaticheskogo upravleniya sledyashchimi privodami oborudovaniya s ChPU* [Automatic control system for tracking drives of CNC equipment]. Patent for utility model RU 27868 U1, 02/20/2003. Application No. 2001129226/20 dated 29.10.2001.

15. Gridin V.N., Titov V.S., Trufanov M.I. *Adaptivnye sistemy tekhnicheskogo zreniya* [Adaptive systems of technical vision]. Moscow, Nauka Publ., 2009.

16. Bobyr M.V., Kulabukhov S.A. [Mathematical model for a new method of Defuzzification in the structure of fuzzy inference]. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika. Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Mechatronics, automation and robotics. Collection of scientific papers of the international scientific and practical conference]. Novokuznetsk, 2018, pp. 218-220 (In Russ.).
17. Bobyr M.V., Kulabukhov S.A. Defazzifikatsiya vyvoda iz bazy nechetkikh pravil na osnove metoda raznosti ploshchadei [Defuzzification of inference from the base of fuzzy rules based on the area difference method]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Bulletin of Computer and Information Technologies*, 2015, no.9, pp.32- 41.
18. Likviyk V.V., Kerre E.E. Defazzification: criteria and classification. *The system of fuzzy sets*. 1999, no.108, pp. 159-178.
19. Piegat A. Fuzzy modeling and control. Physics-Verlag, Heidelberg, 2001, doi:10.1007/978-3-7908-1824-6
20. Vuong P.T., Madni A.M., Vuong J.B. Implementation of VHDL for fuzzy logic controller. In 2006, the World Congress on Automation, WAC'06. IEEE Computer Society (2006)
21. Arduino.ru : Official website of Arduino in Russia [Electronic resource]. Blank from the screen. Available at: <http://arduino.ru/>, free.
22. Collotta M., Bello L.L., Po G. A new approach to dynamic traffic light control based on wireless sensor networks and multiple fuzzy logic controllers. Elsevier: Expert Systems with Applications, pp.5403-5415, March 2015
23. Olanrevaju O. M., Obinii A. A., Junaidi S.B. "The concept of fuzzy logic for the interaction of pedestrians with safety-controlled vehicles". *International Journal of Computer Applications* (0995-8887), June 2017, vol. 167, no. 1.

Информация об авторах / Information about the Authors

Бобырь Максим Владимирович, доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: fregat_mn@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5400-6817>

Maxim V. Bobyr, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: fregat_mn@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5400-6817>

Храпова Наталия Игоревна, магистрант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: KhrapovaNI@yandex.ru

Natalia I. Khrapova, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: KhrapovaNI@yandex.ru

Ламонов Максим Александрович, магистрант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mtopdevice@gmail.com

Maxim A. Lamonov, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mtopdevice@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-177-200>

Метод отслеживания процессов взаимодействия пользователей с объектами на видеопоследовательностях

Р. Н. Яковлев¹ ✉

¹ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: iakovlev.r@mail.ru

Резюме

Цель исследования. При разработке киберфизических систем и интеллектуальных пространств, предназначенных для анализа пользовательской активности, актуальной является задача отслеживания взаимодействий пользователей с объектами.

Методы. В данной работе для решения задачи детектирования и отслеживания взаимодействий пользователей с объектами на видеопоследовательностях был разработан соответствующий метод, основанный на комбинированном использовании нейросетевых моделей детектирования объектов и сегментации пользователей, а также построения карт глубины по кадрам видеоряда. В исследовании представлены соответствующие алгоритмы и алгоритмические модели. Апробация и оценка качества функционирования разработанного метода производилась на основе тестового набора данных, включающего в себя 1000 видеопоследовательностей длительностью до 20 секунд.

Результаты. В ходе экспериментальных исследований были определены показатели точности (ассигасу, recall, precision) детектирования взаимодействий для видеопоследовательностей с уровнем освещенности 100% и 50%, которые составили {0.82, 0.78, 0.76} и {0.70, 0.59, 0.70} соответственно, при этом усредненные доли корректно отслеженных взаимодействий для данных наборов видеопоследовательностей имели значения 81% и 71%. Согласно результатам проведенного тестирования, разработанный метод предоставляет возможность осуществлять детектирование и отслеживание взаимодействий пользователей с объектами в режиме реального времени, в том числе в условиях неполной освещенности сцены.

Заключение. По результатам апробации предложенного метода отслеживания взаимодействий пользователей с объектами на тестовом наборе из 1000 видеопоследовательностей, предложенное решение пока-зало довольно высокое качество детектирования и отслеживания взаимодействий для видеопоследовательностей с уровнями освещенности 100% и 50%. Таким образом, разработанный метод в определенной мере является устойчивым к изменению уровня освещенности сцены и обеспечивает успешное решение задачи детектирования и отслеживания взаимодействия пользователей с различными классами объектов по видеопоследовательности, не требуя при этом применения специализированного оборудования.

Ключевые слова: киберфизические системы; взаимодействие пользователя с объектом; трекинг взаимодействий; Mask R-CNN; Spine-Net; RetinaNet; FCRN-DepthPrediction; Rolo.

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

Для цитирования: Яковлев Р. Н. Метод отслеживания процессов взаимодействия пользователей с объектами на видеопоследовательностях // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 177-200. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-177-200>.

Поступила в редакцию 14.10.2021

Подписана в печать 02.11.2021

Опубликована 20.12.2021

A Method for Tracking the Processes of User Interaction with Objects in Video Sequences

Roman N. Iakovlev¹ ✉

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

✉ e-mail: iakovlev.r@mail.ru

Abstract

Purpose of research. When developing cyber-physical systems and intelligent environment designed to analyze user activity, the task of tracking user interactions with objects is topical.

Methods. In this paper, to solve the problem of detecting and tracking user interactions with objects in video sequences, an appropriate method based on the combined application of neural network models for detecting objects and segmenting users, as well as constructing depth maps based on video sequence frames was developed. The study presents corresponding algorithms and algorithmic models. The testing and assessment of the quality of functioning of the developed method were carried out on the basis of a test data set including 1,000 video sequences with a duration of up to 20 seconds.

Results. In the course of experimental studies, the indicators of accuracy (accuracy, recall, precision) of detecting interactions for video sequences with illumination levels of 100% and 50% were determined, which amounted to {0.82, 0.78, 0.76} and {0.70, 0.59, 0.70}, respectively, while the average proportions of correctly tracked interactions for these sets of video sequences had values of 81% and 71%. According to the results of the conducted testing, the developed method provides an opportunity to detect and track user interactions with objects in real time, including those in conditions of the lack of illumination of the scene.

Conclusion. Based on the results of the testing of the proposed method of tracking user interactions with objects on a test set of 1,000 video sequences, the proposed solution showed a fairly high quality of detecting and tracking interactions in video sequences with illumination levels of 100% and 50%. Thus, the developed method is to a certain extent resistant to changes in the level of illumination of the scene and provides a successful solution to the problem of detecting and tracking user interaction with various classes of objects in the video sequence, without requiring the use of specialized equipment.

Keywords: cyber physical systems; user interaction with an object; tracking interactions; Mask R-CNN; Spine-Net; RetinaNet; FCRN-DepthPrediction; Rolo.

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

For citation: Iakovlev R. N. A Method for Tracking the Processes of User Interaction with Objects in Video Sequences. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 177-200 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-177-200>.

Received 14.10.2021

Accepted 02.11.2021

Published 20.12.2021

Введение

Современные технологии и инструменты компьютерного зрения обес-

печивают решение широкого спектра задач в данной области. Однако на сегодняшний день остается ряд проблем,

решение которых с использованием известных инструментов, оказывается достаточно затруднительным или даже полностью невозможным. К числу подобных задач относится задача отслеживания процессов взаимодействия пользователей с объектами. Программные инструменты решения данной задачи имеют широкий потенциал для использования в производственной сфере, в частности, контроля выполнения регламента работ и обнаружения ошибок сотрудников при работе с изделиями или инструментами. Большинство существующих подходов к решению рассматриваемой задачи предназначены для детектирования взаимодействия с небольшим количеством объектов, требуют использования специализированного оборудования, могут применяться в ограниченном наборе рабочих сред или не позволяют осуществлять трекинг соответствующих взаимодействий по видеопоследовательности, что значительно ограничивает область применения данных решений. Настоящее исследование посвящено разработке метода отслеживания процессов взаимодействия пользователей с объектами, обеспечивающего как детектирование, так и последующий трекинг соответствующего взаимодействия. Предложенный метод должен быть пригодным для использования в различных рабочих условиях с сохранением требуемого уровня точности детектирования и трекинга.

Материалы и методы

Разработка метода отслеживания процессов взаимодействия пользователей с объектами (human-object interaction) по видеопоследовательностям предполагает решение следующей группы задач: детектирование на кадрах видеопоследовательности пар вида «пользователь – объект взаимодействия», идентификация факта начала взаимодействия, трекинг соответствующих пар до завершения процесса взаимодействия.

В настоящее время существует большое количество подходов к решению задачи детектирования объектов на изображениях и видеопоследовательностях [1, 2, 3]. В табл. 1 представлена сравнительная характеристика качества решения задачи детектирования объектов на изображениях на примере известного набора данных COCO [4]. Оценки качества приведены в отношении ряда современных нейросетевых моделей, направленных на решение соответствующей задачи.

Согласно приведенным выше результатам, одним из наиболее перспективных решений в данной области, является предобученная нейронная сеть (NN) RetinaNet с экстрактором признаков SpineNet-190 [5].

Такая модель способна не только осуществлять детектирование объектов на изображении, но и определять классовую принадлежность детектируемых объектов. К типам объектов, которые данная сеть способная идентифицировать, относятся различные категории офисной мебели, иные предметы, а также непосредственно люди.

Таблица 1. Сравнительная характеристика качества решения задачи детектирования объектов на примере набора данных COCO**Table 1.** Comparative characteristics of the quality of solving the problem of detecting objects using the example of the COCO dataset

Нейросетевая модель / Neural network model	AP	AP ₅₀
RetinaNet (SpineNet-190)	52.1	71.8
FAIR Mask R-CNN	50.3	72.0
RetinaNet (ResNet-101-FPN)	39.1	59.1
Mask R-CNN (ResNet-101-FPN)	38.2	60.3
FAIRCNN	33.2	52.0

Таким образом, данная нейронная сеть может быть использована в качестве основы для решения задачи по идентификации пользователей и объектов взаимодействия. Однако формирование корректных пар «пользователь-объект взаимодействия» требует применения дополнительных алгоритмических моделей к результатам работы данной нейронной сети.

В контексте задачи детектирования начала взаимодействия пользователя с объектом существует большое количество методов, направленных на идентификацию типов взаимодействия. Авторами [6] предложена модель Interact-Net, определяющая на фотографиях сложных повседневных сцен тип взаимодействия человека с объектами. Модель обучена на сложном наборе данных V-COCO и решает задачу распознавания триплетов (человек, действие, объект), локализуя контуры человека, связанного объекта взаимодействия и идентифицируя выполняемое действие. Аналогичный проект представили авторы статьи [7]. Они предложили модель

HOI (Human-Object Interaction) для обнаружения взаимодействия человека с объектом, которая в отличие от сложных сквозных моделей использует внешние признаки от предварительно обученных детекторов объектов и кодирует макет с помощью созданных вручную ограничительных элементов координат (не обязательно ключевых точек позы человека). Для определения на изображении 18 ключевых точек каждого человека авторы используют модель Open Pose [8], которая определяет ключевые точки скелета человека на изображении или в видеопотоке. Рассмотренные выше методы [6, 7] обладают достаточно высокой точностью определения вида взаимодействия человека с объектом на основе внешних показателей, но для их успешного применения необходимо, чтобы пользователь и объект в кадре были видны полностью. Недостатком обоих методов также является их ориентация на работу с одиночными изображениями без возможности работы с видеопотоком. Кроме того, в рамках данных методов предполагается, что на

входных данных взаимодействие между пользователем и объектом уже осуществляется, таким образом, данные решения не могут быть использованы для решения задачи детектирования взаимодействия между пользователем и объектом.

Альтернативный подход к идентификации факта начала взаимодействия пользователя с объектом может быть основан на идентификации соприкосновения пользователя с объектом. Для выявления данных ситуаций необходимо осуществлять оценку взаимного расположения объекта и рук пользователя в пространстве, при этом пересечение сегментов рук и объекта на изображении является необходимым, но недостаточным условием совпадения их пространственных положений в связи с отсутствием информации об удаленности

объекта от пользователя по оси перпендикулярной плоскости изображения. Данная информация может быть получена, в частности, на основе анализа результатов работы различных методов построения карт глубины на соответствующем изображении. Таким образом, реализация надежной идентификации факта начала взаимодействия пользователя с объектом требует комбинированного решения задач по детектированию рук пользователя, детектированию объекта, а также анализа результатов работы выбранного метода построения карт глубины на соответствующем изображении для установления факта соприкосновения пользователя с объектом.

Результаты оценки качества в отношении ряда современных решений, полученные на примере набора данных COCO, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительная характеристика качества решения задачи сегментации объектов на примере набора данных COCO

Table 2. Comparative characteristics of the quality of solving the object segmentation problem using the example of the COCO dataset

Модель NN / NN Model	AP	AP ₅₀
Mask R-CNN (SpineNet-190)	46.3	70.9
HRNet	41.0	63.4
Mask R-CNN (ResNeXt-101-FPN)	37.1	60.0
RetinaMask (ResNet-101-FPN)	36.4	57.3
Mask R-CNN (ResNet-101-FPN)	35.7	58.0
Mask R-CNN (ResNet-50-FPN)	35.6	57.6

Большинство решений в области детектирования рук пользователя, сконцентрированы на проблеме определения той или иной позы/жеста руки [9–13], например, в работе [14] исследователи сделали акцент на обучении модели

распознаванию языка жестов. С точки зрения непосредственного решения задачи сегментации рук пользователя актуальным представляется использование широкого инструментария сегментационных моделей NN.

В соответствии с приведенной выше информацией, наиболее подходящим решением в контексте настоящего исследования является модель Mask R-CNN (SpineNet-190) [5], поскольку она ориентирована на выделение сегментов различного рода объектов, требует небольшого количества данных для обучения и при этом характеризуется довольно высоким показателем точности детектирования.

Методы построения карт глубины могут быть классифицированы на две группы: аппаратные [15] и методы, основанные на использовании нейросетевых моделей [16–18]. Во избежание лишних трат на специальную аппаратуру, поддерживающую возможность съемки с собственной картой глубины, была выбрана модель FCRN-Depth-Prediction [18]. Данная модель позволяет строить карту глубины по 2D изображению. Преимуществом FCRN-DepthPrediction в сравнении с другими решениями данной группы является небольшое количество параметров обучения (train parameters), из чего следует, что для обучения требуется меньше данных, чем для аналогичных методов. Архитектура данной сети построена на основе остаточной нейронной сети ResNet-50 [19] и дополняет её Upsampling слоями, которые повышают точность предсказанных карт глубины.

Ожидается, что совместное использование выбранного метода, осуществляющего сегментацию рук пользователя, в совокупности с применением ней-

ронной сети, реализующей детектирование объектов, и нейросетевой модели, обеспечивающей построение карты глубины изображений, позволит достоверно устанавливать факты соприкосновения пользователя с объектом и соответственно обеспечить решение задачи идентификации факта начала взаимодействия пользователя с объектами.

В контексте обеспечения трекинга пар пользователь-объект на видеопоследовательности до завершения процесса взаимодействия пользователя с объектом рассмотрим существующие методы трекинга объектов на видеопоследовательности. На сегодняшний день широкое распространение получили методы, основанные на использовании нейросетевых моделей [20–23]. По результатам проведенного анализа наиболее перспективным представляется решение, предложенное в работе [21]. Авторами была разработана модель, представляющая собой глубокую нейронную сеть, которая принимает в качестве входных данных видеокadres, а возвращает для каждого кадра координаты ограничивающего прямоугольника отслеживаемого объекта. Представленный метод расширяет глубокую сверточную нейронную сеть YOLO [24] в пространственно-временную область с использованием рекуррентных нейронных сетей (ROLO). Авторами была проведена обширная эмпирическая оценка эффективности ROLO в сравнении с 10 существующими решениями задачи трекинга. Сравнительная оценка проводилась

на наборе из 30 сложных общедоступных видеопоследовательностей. Результат оценки значений удачных построений за единичный проход (ОРЕ) представленной в работе модели равен 0.458. В целом, все представленные выше методы демонстрируют достаточно высокую точность трекинга объектов на видеопоследовательности, однако наибольшей эффективностью при сохранении высокого уровня точности обладает метод [21]. Данное решение может быть использовано в режиме реального времени, что положительным образом сказывается на применимости метода к реальным условиям и обуславливает выбор данного решения для обеспечения трекинга пар пользователь-объект взаимодействия на видеопоследовательности.

Таким образом, за счет комбинирования и модернизации рассмотренных выше подходов, методов и моделей в рамках данной работы будет разработан метод отслеживания процессов взаимодействия пользователей с объектами по видеопоследовательностям, не требующий применения специализированных аппаратных решений и отличающийся возможностью использования в режиме реального времени при сохранении высокого уровня точности детектирования и трекинга.

В соответствии с результатами проведенного анализа связанных методов и подходов, для обеспечения отслеживания взаимодействия пользователей с объектами в рамках исследования предлагается авторский метод решения дан-

ной задачи, включающий в себя следующие основные этапы:

1. Детектирование на кадрах видеопоследовательности пар вида пользователь-объект взаимодействия:

а. Детектирование пользователей и объектов с использованием предобученной модели нейронной сети RetinaNet;

б. Определение потенциальных пар пользователь-объект взаимодействия с использованием разработанного алгоритма предварительной идентификации взаимодействия.

2. Идентификация фактов начала взаимодействия:

а. Получение данных о пользователе – детектирование и сегментация рук пользователя с использованием нейросетевой модели Mask R-CNN;

б. Формирование карты глубины для кадров видеопоследовательности с помощью нейронной сети FCRN-Depth-Prediction;

в. Идентификация фактов взаимодействия с использованием разработанного алгоритма, основанного на оценке пространственного положения рук пользователей относительно потенциальных объектов взаимодействия.

3. Анализ процессов взаимодействия пользователей с объектами:

а. Трекинг пар пользователь-объект в процессе взаимодействия за счет применения метода отслеживания объектов на основе рекуррентных нейронных сетей Rolo [21];

б. Идентификация завершения процессов взаимодействия.

Как можно заметить, предложенный метод содержит три ключевых этапа, каждый из которых направлен на решение отдельной группы подзадач. Важным требованием к разрабатываемому решению является обеспечение его работоспособности в режиме реального времени. Таким образом, первый этап применяется к поступающим кадрам видеоряда и направлен не только на идентификацию наборов пользователей и объектов на исследуемой сцене, но также и на снижение объема данных, для которых потребуется осуществлять более глубокую и ресурсоемкую обработку. Второй этап посвящен идентификации пользователей, взаимодействующих с теми или иными объектами на сцене. Важно подчеркнуть, что потенциально каждый пользователь может взаимодействовать с некоторым набором объектов, что выдвигает дополнительные требования к точности производимой оценки в отношении наличия взаимодействия в рамках каждой конкретной пары пользователь-объект. Третий этап связан с отслеживанием тех пар пользователь-объект, для которых было подтверждено наличие взаимодействия. В рамках данного этапа осуществляется трекинг соответствующих пар, а также производится периодическая проверка на завершение процессов взаимодействия. Рассмотрим детальнее каждый из этапов предложенного метода.

Детектирование на кадрах видеопоследовательности пар вида пользователь-объект взаимодействия

Для детектирования пользователей и объектов на кадрах видеоряда в качестве модели применяется предобученная нейронная сеть RetinaNet. Для определения объектов на сцене на вход нейронной сети подается одиночный кадр из видеопотока, предварительно очищенный от шумов за счет применения гауссовой фильтрации. Результатом работы нейронной сети является информация об объектах на изображении: координаты ограничивающих прямоугольников, вероятности принадлежности каждого объекта к определенному классу. Важно отметить, что к числу классов, распознаваемых RetinaNet, также относятся и человек, таким образом, по результатам работы данной нейронной сети выполняется детектирование не только объектов, но и непосредственно пользователей.

Далее осуществляется определение потенциальных пар пользователь – объект взаимодействия, данные пары выявляются в соответствии со следующим алгоритмом:

Для каждого детектированного на некотором изображении пользователя U_i из набора U_{img} , вычислим центр соответствующего ему ограничивающего прямоугольника:

$$Center_i(Box_i) = \frac{(B_x + A_x, B_y + A_y)}{2},$$

$$\{Box_i \in Box_{img} | U_{img} \rightarrow Box_{img}\},$$

где Box_i – ограничивающий прямоугольник, соответствующий детектированному пользователю U_i ; A и B – координаты диагональных вершин ограничивающего прямоугольника Box_i ; U_{img} – набор детектированных на изображении пользователей.

Для каждого детектированного на некотором изображении объекта O_i из набора O_{img} вычислим центр соответствующего ему ограничивающего прямоугольника:

$$OCenter_i(OBox_i) = \frac{(B_x + A_x, B_y + A_y)}{2},$$

$$\{OBox_i \in OBox_{img} \mid O_{img} \rightarrow OBox_{img}\},$$

где $OBox_i$ – ограничивающий прямоугольник, соответствующий детектированному объекту O_j ; A и B – координаты диагональных вершин ограничивающего прямоугольника $OBox_i$; O_{img} – набор детектированных на изображении объектов.

Далее для каждого элемента из наборов Box_{img} и $OBox_{img}$ произведем оценку размера соответствующих ограничивающих прямоугольников согласно следующему выражению:

$$Size(Box) = \frac{\|(B_x - A_x, B_y - A_y)\|}{2},$$

где A и B – координаты диагональных вершин соответствующего ограничивающего прямоугольника из наборов Box_{img} или $OBox_{img}$.

Для каждого пользователя U_i из набора U_{img} определим расстояния между данным пользователем и объектами $O_j \in O_{img}$, детектированными на исследуемой сцене. В качестве расстояния

между пользователем U_i и объектом O_j будем использовать расстояния между центрами соответствующих им ограничивающих прямоугольников:

$$Dist(U_j, O_j) = \|Center_i - OCenter_j\|.$$

Определение потенциального набора пар вида пользователь – объект взаимодействия $PairSet_{pot}$ осуществляется в соответствии со следующим выражением:

$$Pair(U_i, O_j) = \begin{cases} 1, & \frac{Dist(U_i, O_j)}{Size(Box_i) + Size(OBox_j)} \leq \beta \\ 0, & \frac{Dist(U_i, O_j)}{Size(Box_i) + Size(OBox_j)} > \beta, \end{cases}$$

$$Pair(U_i, O_j) \in PairSet_{pot}$$

где β – некоторое строго положительное пороговое значение, характеризующее предельную удаленность пользователя U_i от объекта O_j , при которой объект рассматривается в качестве потенциального объекта взаимодействия для данного пользователя.

По результатам работы данного алгоритма формируется набор потенциальных пар пользователь-объект взаимодействия, которые подлежат дальнейшему анализу на предмет фактического наличия взаимодействия.

Идентификация факта начала взаимодействия

Для идентификации факта взаимодействия пользователя с объектом необходимо предварительно произвести оценку пространственного положения рук каждого пользователя относительно соответствующих потенциальных объектов взаимодействия, что требует пред-

варительного решения задач по детектированию рук пользователя, детектированию объекта, а также построению карты глубины соответствующего изображения.

Для детектирования и сегментации рук пользователя на изображении была выбрана модель Mask R-CNN (SpineNet-190), характеризующаяся высокими показателями точности своей работы и относительно низкими требованиями с точки зрения вычислительных ресурсов для обеспечения собственного функционирования в реальном времени. Входными данными модели является кадр видеопоследовательности, а выходными – сегментированное изображение, с выделенными контурами рук пользователей, а также соответствующими ограничивающими прямоугольниками.

Полученные результаты применения модели масштабируются с целью формирования матрицы соответствия пикселей входного изображения выявленным сегментам рук пользователей. Данная матрица совмещается с результатами детектирования пользователей, полученными на предыдущем этапе, по принципу перекрытия областей с целью обеспечения связности между полученными контурами рук и сформированным ранее набором пользователей U_{img} . Таким образом, каждый выявленный на изображении сегмент руки Arm_k ассоциирован с конкретным пользователем U_i .

Так как детектирование потенциальных объектов взаимодействия было выполнено в рамках предыдущего эта-

па, далее для оценки относительного положения объектов и рук пользователей в трехмерном пространстве необходимо построить карту глубины текущего кадра видеопоследовательности. По результатам проведенного анализа существующих методов построения карты глубины было принято решение воспользоваться моделью нейронной сети FCRN-DepthPrediction, выходными данными которой является матрица значений глубины. Проведение операции масштабирования данной матрицы до размера исходного изображения позволяет обеспечить соответствие пикселей входного изображения и полученных значений глубины.

Следующий шаг заключается в оценке положения рук каждого пользователя относительно соответствующих потенциальных объектов взаимодействия в рамках определённых на предыдущем этапе пар пользователь – объект взаимодействия. Для каждой пары $P_n = (U_i; O_j)$ из набора потенциальных пар пользователь – объект взаимодействия $PairSet_{pot}$ оценка пространственного положения объектов относительно рук пользователей производится в соответствии со следующим алгоритмом идентификации взаимодействия:

Для каждой руки $Arm_k \in Arm_{img}$, детектированной на кадре видеопоследовательности и ассоциированной с некоторым пользователем U_i , определим центр соответствующего ограничивающего прямоугольника:

$$ACenter_k(ABox_k) = \frac{(B_x + A_x, B_y + A_y)}{2},$$

$$\{ABox_k \in ABox_{img} \mid Arm_{img} \rightarrow ABox_{img}\},$$

где $ABox_k$ – ограничивающий прямоугольник, соответствующий детектированной руке Arm_k ; A и B – координаты диагональных вершин ограничивающего прямоугольника $ABox_k$; Arm_{img} – набор задетектированных на изображении рук.

Определим вектор, характеризующий положение центра объекта O_j относительно центра руки $ACenter_k$, следующим образом:

$$direct_n = OCenter_j - ACenter_k.$$

В общем случае карту глубины можно рассматривать как дискретно заданную функцию F , определенную на множестве пар (x, y) , где x и y – значения индексов пикселей исследуемого кадра видеопоследовательности по горизонтальной и вертикальной осям соответственно. В качестве характеристики изменения удаленности руки Arm_k и объекта O_j в направлении перпендикулярном плоскости изображения возьмем двустороннюю разностную оценку производной данной функции dF по направлению $direct_n$. Произведем расчет данных оценочных значений на отрезке $[ACenter_k, OCenter_j]$ в соответствии со следующим выражением:

$$\frac{dF}{d(direct_n)}(Point_q) =$$

$$= \frac{F(Point_0 + \gamma \cdot \frac{direct_n}{|direct_n|}) - F(Point_0 - \gamma \cdot \frac{direct_n}{|direct_n|})}{2 \cdot \gamma},$$

где γ – параметр шага, а $Point_q = (x_q, y_q)$ – q -ый пиксель изображения, который принадлежит отрезку $[ACenter_k, OCenter_j]$.

Результирующий вывод относительно наличия взаимодействия между пользователем и объектом осуществляется в соответствии со следующим выражением:

$$\forall Point_q \in Points, \left| \frac{dF}{d(direct_n)}(Point_q) \right| \leq \theta,$$

где $Points$ – набор пикселей изображения, которые принадлежат отрезку $[ACenter_k, OCenter_j]$; θ – некоторое строго положительное пороговое значение, характеризующее предельное изменение величины удаленности при смещении вдоль отрезка $[ACenter_k, OCenter_j]$ и выполняющее роль критерия идентификации резких изменений значений глубины в данном направлении. В случае, если представленное выше выражение истинно, делается вывод о наличии взаимодействия пользователя с объектом в рамках пары $P_n = (U_i; O_j)$.

Таким образом, по итогам данного этапа для каждой пары P_n из набора $PairSet_{pot}$ делается окончательный вывод о наличии взаимодействия между пользователями и объектами, в результате чего формируется набор пар вида пользователь – объект взаимодействия $PairSet_{res}$.

Анализ процессов взаимодействия пользователей с объектами

Как было сказано ранее, данный этап связан с отслеживанием тех пар пользователь-объект, для которых было подтверждено наличие взаимодействия. В

рамках данного этапа осуществляется трекинг соответствующих пар, а также производится периодическая проверка на завершение процессов взаимодействия. Трекинг пар пользователь-объект в процессе их взаимодействия обеспечивается за счет применения метода отслеживания объектов на основе рекуррентных нейронных сетей Rolo [21]. На вход данному методу подается информация об отслеживаемом объекте – соответствующий ограничивающий прямоугольник, а также поступающие кадры исследуемой видеопоследовательности. Для каждого поданного кадра данный метод возвращает обновленные параметры ограничивающего прямоугольника для отслеживаемого объекта. Таким образом, обеспечивается отслеживание всех пар P_n из результирующего набора $PairSet_{res}$. Проверка на завершение взаимодействия для каждой пары P_n инициируется на каждом j -ом кадре видеопоследовательности и реализуется в соответствии с алгоритмом идентификации взаимодействия, рассмотренном ранее в рамках второго этапа. По результатам выполнения данной проверки определяется актуальный набор взаимодействующих пар пользователь-объект $PairSet_{final}$.

Обобщенная алгоритмическая модель разработанного метода отслеживания процессов взаимодействия пользователей с объектами представлена ниже на рис. 1. Важно отметить, что пред-

ставленная ниже алгоритмическая модель предполагает анализ лишь каждого m -го кадра видеопоследовательности. При этом доля анализируемых кадров может быть как увеличена для достижения большей точности отслеживания, так и уменьшена с целью минимизации затрачиваемых вычислительных ресурсов. Кроме того, данная алгоритмическая модель учитывает возможность возникновения случаев множественного взаимодействия как некоторого пользователя с группой объектов, так и нескольких пользователей с одним объектом за счет предложенной реализации процесса выявления потенциальных пар пользователь-объект.

Ниже на рис. 2 представлены поэтапные результаты работы сформированной модели на некотором кадре видеопоследовательности.

Где а) исходный кадр видеопоследовательности; б) результаты детектирования пользователей и объектов; в) результаты выявления потенциальных пар пользователь-объект взаимодействия; г) результаты детектирования и сегментации рук пользователей; д) результаты формирования карты глубины для данного кадра видеоряда; е) результаты оценки производной функции dF в соответствии с алгоритмом идентификации взаимодействий; ж) результат идентификации взаимодействий между потенциальными парами пользователь-объект.

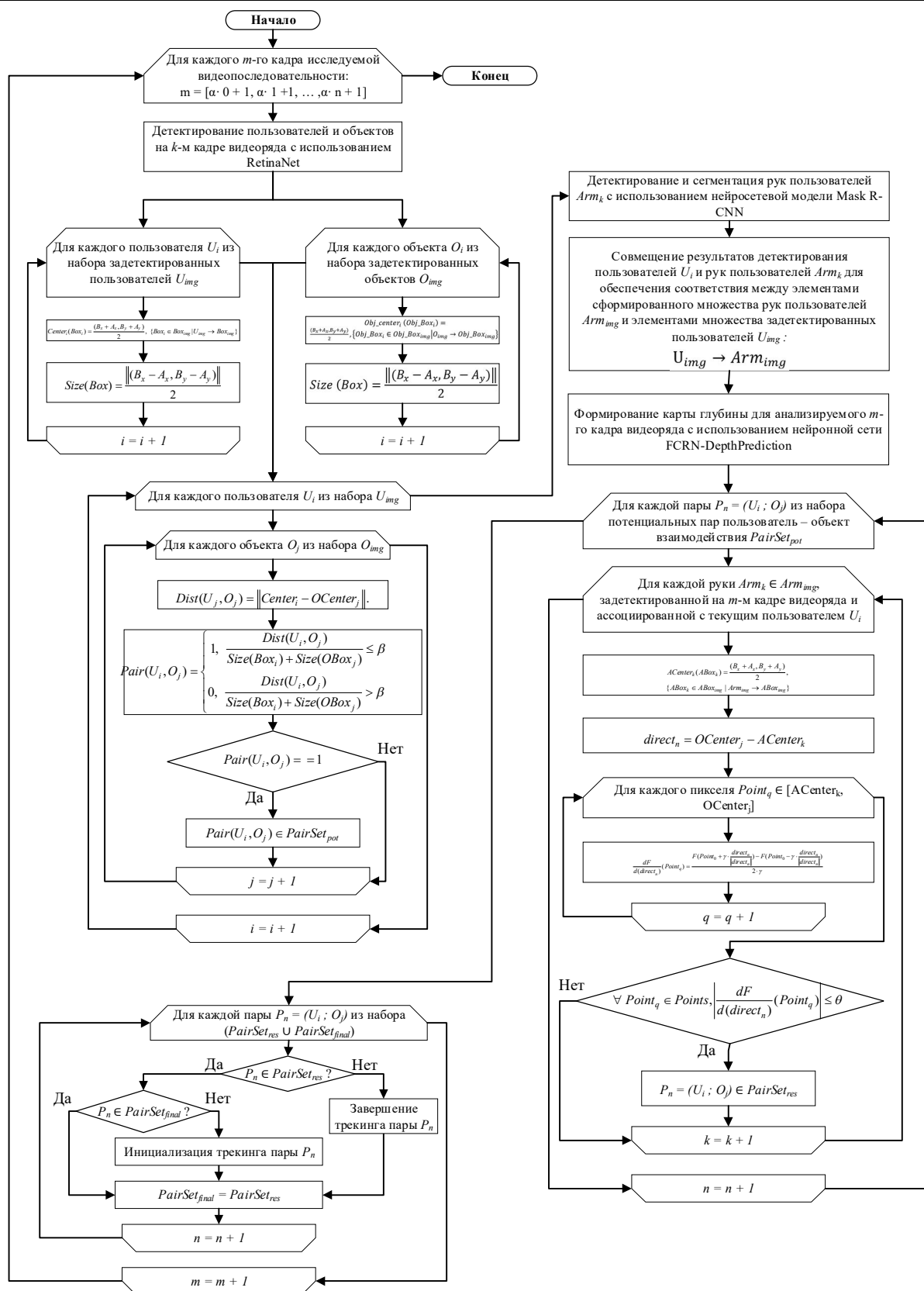


Рис. 1. Обобщенная алгоритмическая модель разработанного метода отслеживания процессов взаимодействия пользователей с объектами на видеопоследовательности

Fig. 1. Generalized algorithmic model of the developed method for tracking the processes of user interaction with objects in a video sequence

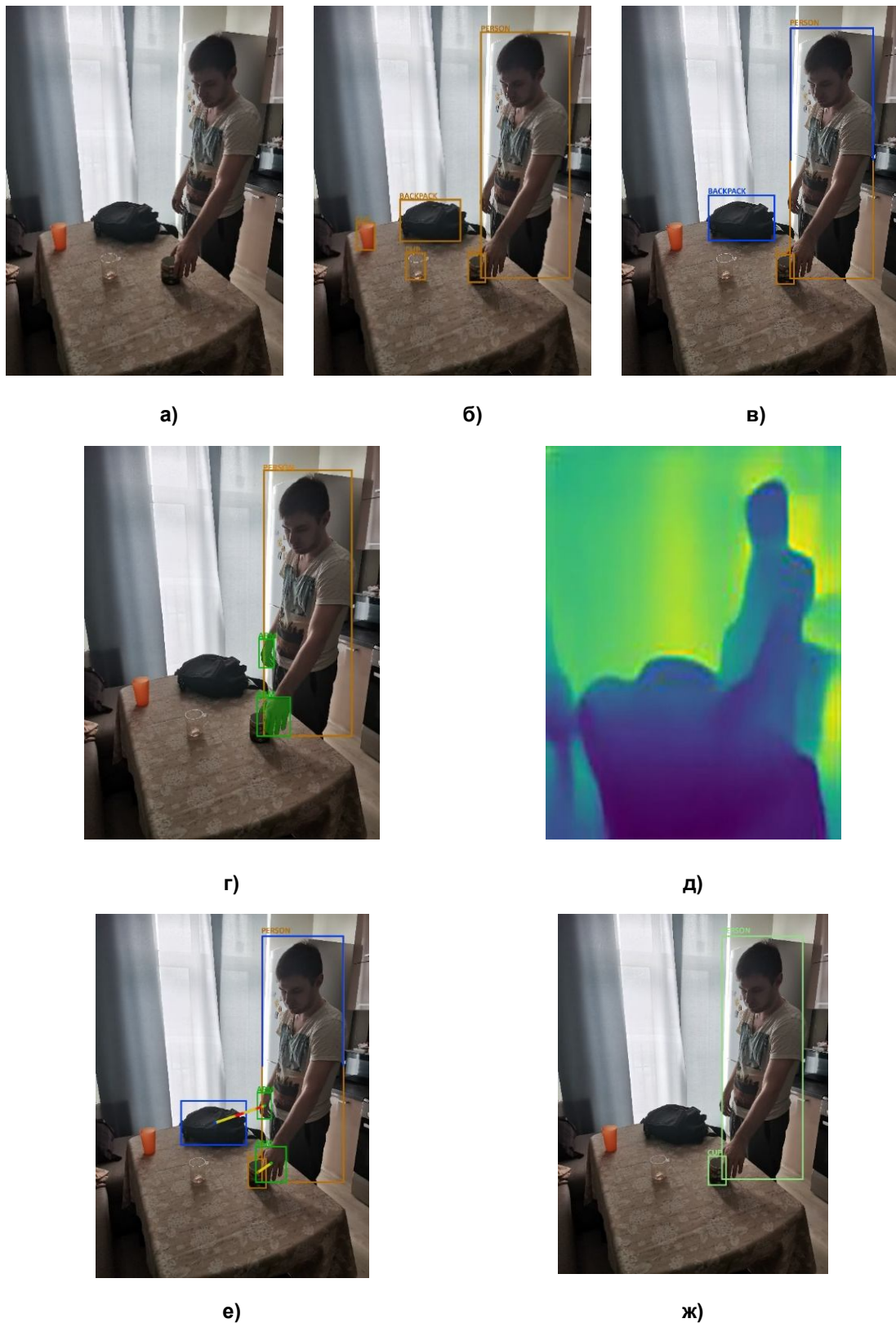


Рис. 2. Поэтапные результаты работы предложенной алгоритмической модели на некотором кадре видеопоследовательности

Fig. 2. Step-by-step results of the proposed algorithmic model for a certain frame of the video sequence

На рис. 2,а представлен обрабатываемый кадр видеопоследовательности. Согласно разработанной модели, в первую очередь осуществляется детектирование пользователей и объектов с использованием нейросетевой модели RetinaNet (рис. 2,б). На данном кадре был детектирован один пользователь и четыре объекта: три чашки и один рюкзак. Далее, в соответствии с разработанным алгоритмом, выполняется поиск потенциальных пар пользователь-объект взаимодействия, результаты работы данного алгоритма отражены на рис. 2,в. Было определено 2 потенциальные пары: пользователь-рюкзак, пользователь-чашка (ограничивающий прямоугольник отображен на рисунке). После того, как потенциальные пары взаимодействующих пользователей и связанных с ними объектов определены, выполняется детектирование и сегментация рук пользователей с использованием нейросетевой модели Mask R-CNN. На рис. 2,г представлены найденные на данном кадре видеопоследовательности сегменты рук пользователей. Следующим шагом является построение карты глубины для соответствующего изображения, полученные с помощью нейронной сети FCRN-DepthPrediction результаты представлены на рис. 2,д. Далее производится анализ отдельных участков полученной карты глубины, и, в частности, осуществляется двусторонняя разностная оценка производной функции dF по направлению, связывающему центр руки пользователя и центр соответствующего

объекта. Результаты, полученные для данного кадра видеопоследовательности, представлены на рис. 2,е и отражены соответствующими линиями, при этом цвет линии по умолчанию является желтым, но на участках, где оценка производной функции dF превосходит заданное пороговое значение, цвет линии становится красным. Для потенциальной пары пользователь-рюкзак данная линия имеет красные участки, что, в соответствии с логикой разработанной модели, свидетельствует об отсутствии взаимодействия пользователя с данным объектом. Таким образом, в качестве фактически взаимодействующих пар, моделью выделена лишь пара пользователь-чашка (ограничивающий прямоугольник отображен на рис. 2,ж). Данный результат работы алгоритма идентификации взаимодействия следует считать корректным, так как в действительности взаимодействие пользователя с рюкзаком или иным объектом сцены, помимо чашки, отсутствует.

Далее перейдем к оценке реализации предложенного метода в контексте качества детектирования и отслеживания взаимодействий пользователей с объектами на видеопоследовательностях.

Результаты и их обсуждение

Апробация и оценка качества функционирования разработанного метода отслеживания процессов взаимодействия пользователей с объектами производилась на основе тестового набора данных, включающего в себя 1000 ви-

деопоследовательностей длительностью до 20 секунд. В тестовом наборе данных присутствовали видеопоследовательности как с одним, так и с несколькими пользователями, взаимодействующими с объектами сцены. На каждой тестовой видеопоследовательности представлено как минимум одно взаимодействие одного из следующих типов: один пользователь – один объект, один пользователь – несколько объектов, несколько пользователей – один объект. Объекты взаимодействия представляют собой объекты 15 различных классов, подлежащих детектированию нейронной сетью RetinaNet. Тестовый набор данных состоит из видеопоследовательностей, сформированных при различных условиях освещенности: 30%, 50% и 100%, где за 100% взят нормативный уровень освещенности для офисных помещений¹.

На основе данных, полученных в результате применения разработанного метода к набору тестовых видеопоследовательностей, были сформированы различные количественные оценки точности работы предложенного решения. В частности, были определены усредненные показатели точности (ассигура, recall, precision) детектирования взаимодействий в разрезе классов объектов взаимодействия и уровней освещенно-

сти. Значения соответствующих показателей были вычислены следующим образом:

Для каждой видеопоследовательности на основе анализа результатов применения двух первых этапов разработанного метода были сформированы матрицы ошибок идентификации взаимодействия M_{ij} . Далее для каждой матрицы M_{ij} были определены показатели ассигуры A_{ij} , recall R_{ij} и precision Pr_{ij} в соответствии со следующими формулами:

$$A_{ij} = \frac{TP_{ij} + TN_{ij}}{TP_{ij} + FP_{ij} + FN_{ij} + TN_{ij}},$$

$$R_{ij} = \frac{TP_{ij}}{TP_{ij} + FN_{ij}},$$

$$Pr_{ij} = \frac{TP_{ij}}{TP_{ij} + FP_{ij}}.$$

На заключительном шаге осуществлялось усреднение данных показателей в разрезе отдельных классов объектов $j = \{1 \dots 15\}$ и уровней освещенности сцены $L = \{30\%, 50\%, 100\%\}$. С этой целью из общего набора видеопоследовательностей формировались специфические наборы видеопоследовательностей $V_{set_{jL}}$, включающие в себя лишь видеопоследовательности V_k с заданным уровнем освещенности L и содержащие на сцене объекты j -го класса. Таким образом, усредненные показатели точности A_{jL} , R_{jL} , Pr_{jL} были определены в соответствии со следующими выражениями:

$$A_{jL} = \frac{1}{n_{jL}} \sum_{k=1}^{n_{jL}} A_{jL}(V_k), \quad V_k \in V_{set_{jL}};$$

¹ ГОСТ Р 55710-2013. Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 ноября 2013 г. N 1364-ст. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200105707> (дата обращения: 27.04.2020). Текст: электронный.

$$R_{jL} = \frac{1}{n_{jL}} \sum_{k=1}^{n_{jL}} R_{jL}(V_k), \quad V_k \in V_{set_{jL}};$$

$$Pr_{jL} = \frac{1}{n_{jL}} \sum_{k=1}^{n_{jL}} Pr_{jL}(V_k), \quad V_k \in V_{set_{jL}}.$$

Ниже на рис. 3 представлены диаграммы полученных значений показателей A_{jL} , R_{jL} , Pr_{jL} для различных классов

сов объектов j при разных уровнях освещенности сцены L .

Из представленных выше рисунков можно заключить, что точность работы метода существенным образом зависит от уровня освещенности и значительно снижается при понижении уровня освещенности.

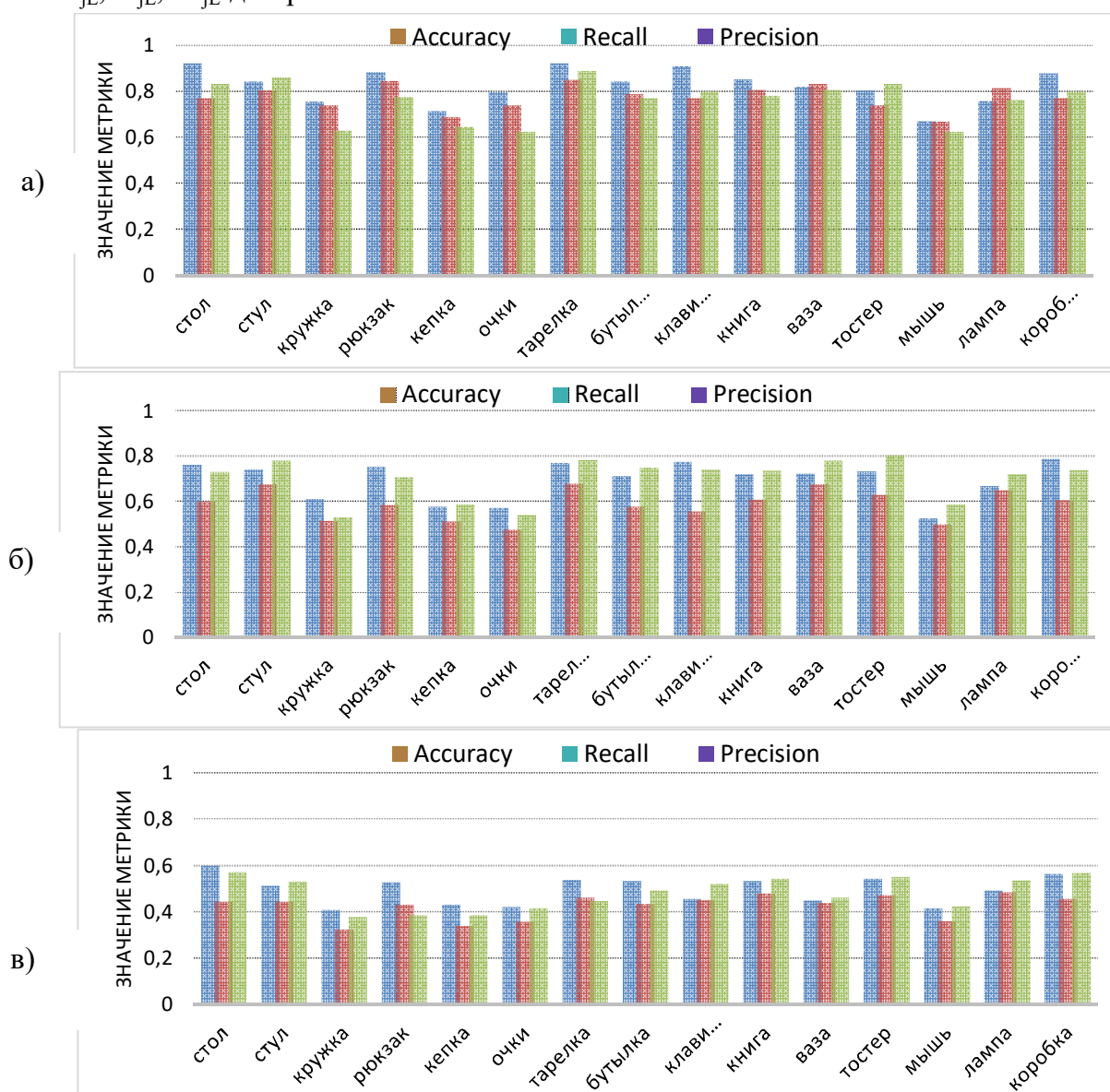


Рис. 3. Диаграммы полученных значений показателей A_{jL} , R_{jL} , Pr_{jL} для различных классов объектов j при уровнях освещенности сцены L : 100% (а), 50% (б), 30% (в)

Fig. 3. Diagrams of the obtained values of the indicators A_{jL} , R_{jL} , Pr_{jL} for various classes of objects j at scene illumination levels L : 100% (а), 50% (б), 30% (в)

При этом стоит отметить, что при переходе от уровня освещенности в 100% к 50% наибольшее снижение испытывает показатель R_{jL} , при следующем переходе к 30% уровню освещенности все показатели испытывают примерно равную степень снижения. Полученные результаты могут быть объяснены тем, что понижение уровня освещенности сказывается в первую очередь на качестве детектирования объектов. Таким образом, пропускается часть потенциальных пар пользователь-объект, при этом качество идентификации взаимодействий ухудшается в меньшей степени, что обуславливает меньшую долю ошибок вида FP. Однако при еще больших снижениях уровня освещенности помимо ошибок детектирования, возникают также значительные погрешности при построении карт глубины, что существенным образом сказывается на качестве идентификации взаимодействий. Данная ситуация наблюдается при применении разработанного метода на видеопоследовательностях с уровнем освещенности в 30%. Важно отметить, что класс объекта также влияет на качество детектирования взаимодействий, в частности рассчитанные показатели имеют более низкие значения для объектов следующих классов: кружка, кепка, очки, мышь. Предполагается, что подобные результаты связаны с меньшим размером данных объектов, а также с их геометрическими особенностями.

Усредненные по классам значения показателей A_{jL} , R_{jL} , Pr_{jL} для видеопос-

ледовательностей с различными уровнями освещенности равны $\{0.82, 0.78, 0.76\}$, $\{0.70, 0.59, 0.70\}$, $\{0.49, 0.43, 0.48\}$ для 100%, 50% и 30% уровней освещенности соответственно. В целом на основе полученных результатов можно заключить, что разработанный метод демонстрирует приемлемое качество детектирования взаимодействий для видеопоследовательностей с уровнями освещенности в 100% и 50%.

Для осуществления оценки непосредственно качества отслеживания процессов взаимодействия пользователей с объектами было принято решение в качестве основной метрики воспользоваться долей корректно отслеженных взаимодействий. Взаимодействие рассматривалось как корректно отслеженное в случае, если:

Взаимодействие было задетектировано не позднее чем через время $\Delta t = 0.05T$ от фактического начала взаимодействия, где T соответствует интервалу времени, когда взаимодействие фактически имело место;

Временной интервал фиксации взаимодействия посредством разработанного метода соответствует реальному не менее, чем на 70% с нулевым смещением;

Момент времени завершения взаимодействия, полученный с использованием разработанного метода, соответствует фактическому с отклонением не более чем $\pm 0.05T$.

Ниже на рис. 4 представлена диаграмма доли корректно отслеженных взаимодействий для каждой видеопоследовательности из тестового набора.

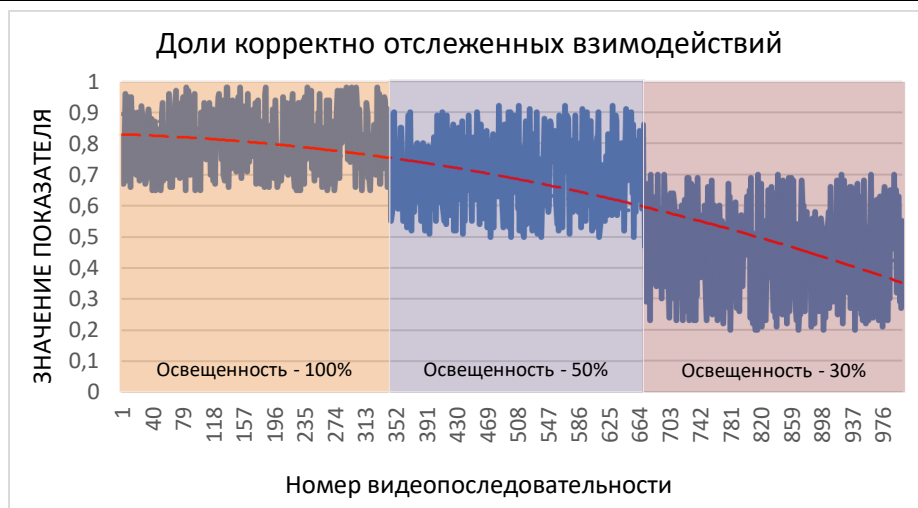


Рис. 4. Диаграмма доли корректно отслеженных взаимодействий для тестового набора видеопоследовательностей

Fig. 4. Diagram of the proportion of correctly tracked interactions for a test set of video sequences

Разработанный метод демонстрирует довольно высокую точность отслеживания взаимодействий для видеопоследовательностей со 100% уровнем освещенности. При этом по аналогии с качеством детектирования взаимодействий при использовании предложенного метода на видеопоследовательностях с более низким уровнем освещенности точность отслеживания взаимодействий становится существенно ниже, что проиллюстрировано на рисунке выше соответствующей линией тренда. Усредненная доля корректно отслеженных взаимодействий для наборов видеопоследовательностей с уровнем освещенности 100%, 50% и 30% составила соответственно 0.81, 0.71 и 0.45, а оценка среднеквадратического отклонения данной величины 0.09, 0.12, 0.15. Полученные результаты свидетельствуют о том, что со снижением уровня освещенности имеет место не только снижение точности работы предложен-

ного решения, но и повышение вариативности результатов. Тем не менее, качество работы метода остается на приемлемом уровне для видеопоследовательностей даже с 50% уровнем освещенности. Однако при дальнейшем снижении освещенности наблюдается критическое снижение качества отслеживания взаимодействий и уже при 30% уровне освещенности метод становится непригоден к практическому применению. Таким образом, предложенное решение позволяет успешно детектировать и отслеживать взаимодействия пользователей с различными классами объектов по видеопоследовательностям и в определенной мере является пригодным к использованию в условиях неполной освещенности сцены.

Выводы

По результатам апробации предложенного метода отслеживания взаимодействий пользователей с объектами на

тестовом наборе из 1000 видеопоследовательностей, предложенное решение показало довольно высокое качество детектирования и отслеживания взаимодействий для видеопоследовательностей с уровнями освещенности 100% и 50%. Усредненные показатели точности (accuracy, recall, precision) детектирования взаимодействий для соответствующих наборов видеопоследовательностей имеют значение {0.82, 0.78, 0.76} и {0.70, 0.59, 0.70}, а усредненные доли корректно отслеженных взаимодействий для данных наборов видеопоследовательностей составили 81% и 71%. Однако при более низких уровнях освещенности точность работы разработанного решения продемонстрировала значительное снижение – на наборе видеопоследовательностей с уровнем освещенности 30% усредненные показатели точности составили {0.49, 0.43, 0.48}, а доля корректно отслеженных взаимодействий снизилась до 45%. По-

лученные результаты могут быть объяснены тем, что при снижении уровня освещенности также существенно снижается качество функционирования заложенных в основу предложенного метода моделей. Таким образом, разработанный метод в определенной мере является устойчивым к изменению уровня освещенности сцены и обеспечивает успешное решение задачи детектирования и отслеживания взаимодействия пользователей с различными классами объектов по видеопоследовательности, не требуя при этом применения специализированного оборудования.

В рамках дальнейших исследований предполагается осуществить модернизацию разработанного метода с точки зрения потребляемых вычислительных ресурсов с целью его последующей интеграции в киберфизическую систему, ориентированную на анализ пользовательской активности.

Список литературы

1. Masking salient object detection, a mask region-based convolutional neural network analysis for segmentation of salient objects / B.A. Krinski, D.V. Ruiz, G.Z. Machado, E. Todt // 2019 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2019 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2019 Workshop on Robotics in Education (WRE). IEEE, 2019. P. 55-60.
2. He K., Girshick R., Dollár P. Rethinking imagenet pre-training // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2019. P. 4918-4927.
3. Coco common objects in context [Электронный ресурс] // Detection Leaderboard [сайт]. URL: <https://cocodataset.org/#detection-leaderboard>.
4. Lin T. Y. et al. Microsoft coco: Common objects in context // European conference on computer vision. 2014. С. 740-755.

5. SpineNet: Learning scale-permuted backbone for recognition and localization / X. Du, T.Y. Lin, P. Jin, G. Ghiasi, M. Tan, Y Cui., X. Song // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2020. P. 11592-11601.
6. Detecting and recognizing human-object interactions / G. Gkioxari, R. Girshick, P. Dollár, K. He // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018. P. 8359-8367.
7. Scaling human-object interaction recognition through zero-shot learning / L. Shen, S. Yeung, J. Hoffman, G. Mori, L. Fei-Fei // 2018 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). IEEE, 2018. P. 1568-1576.
8. OpenPose: realtime multi-person 2D pose estimation using Part Affinity Fields / Z. Cao, G. Hidalgo, T. Simon, S. E. Wei, Y. Sheikh // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2019. Vol. 43. №. 1. P. 172-186.
9. 3d hand pose detection in egocentric rgb-d images / G. Rogez, M. Khademi, III Supancic, J., J.M.M. Montiel, D. Ramanan // European Conference on Computer Vision. Springer, Cham, 2014. P. 356-371.
10. Hand pose estimation and hand shape classification using multi-layered randomized decision forests / C. Keskin, F. Kırac, Y.E. Kara, L. Akarun // European Conference on Computer Vision. Springer, Berlin, Heidelberg. 2012. P. 852-863.
11. Oberweger M., Wohlhart P., Lepetit V. Hands deep in deep learning for hand pose estimation // Proceedings of 20th Computer Vision Winter Workshop (CVWW). 2015. P. 21-30. arXiv preprint arXiv:1502.06807.
12. First-person hand action benchmark with rgb-d videos and 3d hand pose annotations / G. Garcia-Hernando, S. Yuan, S. Baek, T. K. Kim // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2018. P. 409-419.
13. Moon G., Chang J.Y., Lee K.M. V2v-posenet: Voxel-to-voxel prediction network for accurate 3d hand and human pose estimation from a single depth map // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern Recognition. 2018. P. 5079-5088.
14. Redmon J., Farhadi A. Yolov3: An incremental improvement //arXiv preprint arXiv:1804.02767. 2018.
15. Murawski K., Murawska M., Pustelny T. Optimizing the light source design for a sensor to measure the stroke volume of the artificial heart // 13th Conference on Integrated Optics: Sensors, Sensing Structures, and Methods. International Society for Optics and Photonics, 2018. Vol. 10830. P. 1083006.
16. Karsch K., Liu C., Kang S. B. Depth extraction from video using non-parametric sampling // European conference on computer vision. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. P. 775-788.
17. Eigen D., Fergus R. Predicting depth, surface normals and semantic labels with a common multi-scale convolutional architecture // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2015. P. 2650-2658.

18. Deeper depth prediction with fully convolutional residual networks / I. Laina, C. Rupprecht, V. Belagiannis, F. Tombari, N. Navab // 2016 Fourth international conference on 3D vision (3DV). IEEE, 2016. P. 239-248.
19. Deep residual learning for image recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016. P. 770-778.
20. Cheong Y. Z., Chew W. J. The Application of Image Processing to Solve Occlusion Issue in Object Tracking // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018. Vol. 152. P. 03001.
21. Spatially supervised recurrent convolutional neural networks for visual object tracking / G. Ning, Z. Zhang, C. Huang, X. Ren, H. Wang, C. Cai, Z. He // 2017 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (IS-CAS). IEEE, 2017. P. 1-4.
22. Real-time visual object tracking with natural language description / Q. Feng, V. Ablavsky, Q. Bai, G. Li, S. Sclaroff // Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision. 2020. P. 700-709.
23. Deep reinforcement learning for visual object tracking in videos / D. Zhang, H. Maei, X. Wang, Y.F. Wang // arXiv preprint arXiv:1701.08936. 2017.
24. You only look once: Unified, real-time object detection / J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016. P. 779-788.

References

1. Krinski B.A., Ruiz D.V., Machado G.Z., Todt E. Masking salient object detection, a mask region-based convolutional neural network analysis for segmentation of salient objects. *Latin American Robotics Symposium (LARS), 2019 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2019 Workshop on Robotics in Education (WRE)*, IEEE, 2019, pp. 55-60.
2. He K., Girshick R., Dollár P. Rethinking imagenet pre-training. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, 2019, pp. 4918-4927.
3. Coco common objects in context [Electronic resource]. Detection Leaderboard [site]. Available at: <https://cocodataset.org/#detection-leaderboard>.
4. Lin T. Y. et al. Microsoft coco: Common objects in context. *European conference on computer vision*, 2014, pp. 740-755.
5. Du X., Lin T.Y., Jin P., Ghiasi G., Tan M., Cui Y., Song X. SpineNet: Learning scale-permuted backbone for recognition and localization. *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2020, pp. 11592-11601.
6. Gkioxari G., Girshick R., Dollár P., He K. Detecting and recognizing human-object interactions. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, pp. 8359-8367.

7. Shen L., Yeung S., Hoffman J., Mori G., Fei-Fei L. Scaling human-object interaction recognition through zero-shot learning. *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), IEEE*, 2018, pp. 1568-1576.
8. Cao Z., Hidalgo G., Simon T., Wei S. E., Sheikh Y. OpenPose: realtime multi-person 2D pose estimation using Part Affinity Fields. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2019, vol. 43, no. 1, pp. 172-186.
9. Rogez G., Khademi M., Supancic III, J., Montiel J.M.M., Ramanan D. 3d hand pose detection in egocentric rgb-d images. *European Conference on Computer Vision, Springer, Cham*, 2014, pp. 356-371.
10. Keskin C., Kırac F., Kara Y.E., Akarun L. Hand pose estimation and hand shape classification using multi-layered randomized decision forests. *European Conference on Computer Vision. Springer. Berlin, Heidelberg*, 2012, pp. 852-863.
11. Oberweger M., Wohlhart P., Lepetit V. Hands deep in deep learning for hand pose estimation. *Proceedings of 20th Computer Vision Winter Workshop (CVWW)*, 2015, pp. 21-30. arXiv preprint arXiv:1502.06807.
12. Garcia-Hernando G., Yuan S., Baek S., Kim T. K. First-person hand action benchmark with rgb-d videos and 3d hand pose annotations. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2018, pp. 409-419.
13. Moon G., Chang J.Y., Lee K.M. V2v-posenet: Voxel-to-voxel prediction network for accurate 3d hand and human pose estimation from a single depth map. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern Recognition*, 2018, pp. 5079-5088.
14. Redmon J., Farhadi A. Yolov 3: An incremental improvement. *arXiv preprint arXiv:1804.02767*. 2018.
15. Murawski K., Murawska M., Pustelny T. Optimizing the light source design for a sensor to measure the stroke volume of the artificial heart. *13th Conference on Integrated Optics: Sensors, Sensing Structures, and Methods. International Society for Optics and Photonics*, 2018, vol. 10830, 1083006 p.
16. Karsch K., Liu C., Kang S. B. Depth extraction from video using non-parametric sampling. *European conference on computer vision. Springer, Berlin, Heidelberg*, 2012, pp. 775-788.
17. Eigen D., Fergus R. Predicting depth, surface normals and semantic labels with a common multi-scale convolutional architecture. *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2015, pp. 2650-2658.
18. Laina I., Rupprecht C., Belagiannis V., Tombari F., Navab N. Deeper depth prediction with fully convolutional residual networks. *2016 Fourth international conference on 3D vision (3DV). IEEE*, 2016, pp. 239-248.
19. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, pp. 770-778.

20. Cheong Y. Z., Chew W. J. The Application of Image Processing to Solve Occlusion Issue in Object Tracking. *MATEC Web of Conferences, EDP Sciences*, 2018, vol. 152, 03001 p.
21. Ning G., Zhang Z., Huang C., Ren X., Wang H., Cai C., He Z. Spatially supervised recurrent convolutional neural networks for visual object tracking. *2017 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (IS-CAS), IEEE*, 2017, pp. 1-4.
22. Feng Q., Ablavsky V., Bai Q., Li G., Sclaroff S. Real-time visual object tracking with natural language description. *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision*, 2020, pp. 700-709.
23. Zhang D., Maei H., Wang X., Wang Y.F. Deep reinforcement learning for visual object tracking in videos. *arXiv preprint arXiv:1701.08936*. 2017.
24. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You only look once: Unified, real-time object detection. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, pp. 779-788.

Информация об авторе / Information about the Author

Яковлев Роман Никитич, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социоконвергентных систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: iakovlev.r@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6721-9707>

Roman N. Iakovlev, Junior Researcher of Laboratory of Big Data Technologies in Socio-Cyberphysical Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: iakovlev.r@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6721-9707>

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-201-219>

Методика формирования оптимальной совокупности запасного оборудования в организационно-технологической системе обеспечения механической сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера

Е.Э. Аверченкова¹✉, А.А. Шабанов²

¹ Брянский государственный технический университет
ул. Горького, д.36, г. Брянск 241050, Российская Федерация

² Московское производственное объединение "Металлист"
2-й Донской пр., д. 4, г. Москва 119071, Российская Федерация

✉ e-mail: lena_ki@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка методики формирования оптимальной совокупности запасных инструментов, приборов, приспособлений и запасных частей.

Методы. Совокупность запасного оборудования в организационно-технологической системе обеспечения механической сборки на основе резьбовых соединений на предприятиях автомобилестроительного кластера представлена в работе на основе теоретико-множественного подхода. Также для описания совокупности запасного оборудования используются теоретико-множественные модели совокупности запасных сборочных инструментов, приборов и приспособлений и совокупности запасных частей к данному оборудованию. Описание особенности организации ремонтной службы в организационно-технологической системе обеспечения механической сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера осуществлялось с применением принципов и понятий теории управления. Формализация процесса принятия решения по формированию совокупности запасного оборудования основывается на методах теории принятия решений. Отдельные элементы методики основаны на использовании методов математического анализа и теории нечетких множеств.

Результаты. Предложена теоретико-множественная модель совокупности запасных сборочных инструментов, приборов, приспособлений и запасных частей. Описана структура и процесс принятия решения по формированию совокупности запасных сборочных инструментов, приборов, приспособлений и запасных частей. Предложена методика и алгоритм формирования оптимальной совокупности запасных инструментов, приборов, приспособлений и запчастей. Методика и алгоритм учитывают статистические параметры отказов оборудования и позволяют оптимизировать затраты на закупку сборочного оборудования, оборудования контроля и поверки и запасных частей к ним.

Заключение. Разработанные модели совокупности запасных сборочных инструментов, приборов, приспособлений и запасных частей, и методика и алгоритм формирования оптимальной совокупности запасных сборочных инструментов, приборов, приспособлений и запасных частей позволяют упростить управленческую работу на предприятии автомобилестроительного кластера. Разработанные модели, методика и алгоритм сокращают негативное влияние факторов, связанных с недостаточным уровнем знаний лиц, принимающих решения и решают задачу оптимального управления подсистемой запасных инструментов, приборов, приспособлений и запасных частей, входящей в организационно-технологическую систему обеспечения механической сборки.

Ключевые слова: система управления; организационно-технологическое обеспечение производства; автомобилестроительный кластер.

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

Для цитирования: Аверченкова Е.Э., Шабанов А.А. Методика формирования оптимальной совокупности запасного оборудования в организационно-технологической системе обеспечения механической сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 201-219. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-201-219>.

Поступила в редакцию 04.10.2021

Подписана в печать 29.11.2021

Опубликована 20.12.2021

The Methodology for Creating the Optimal Set of Spare Equipment in the Organizational and Technological System for Providing Mechanical Assembly at the Enterprises of the Motor-Car Construction Cluster

Elena E. Averchenkova ¹ ✉, Aleksei A. Shabanov ²

¹ Bryansk State Technical University
36, Gorkogo str., Bryansk 241050, Russian Federation

² Moscow Production Association "Metallist"
4, 2nd Donskoy proezd, Moscow 119071, Russian Federation

✉ e-mail: lena_ki@inbox.ru

Резюме

Purpose of research. Development of a methodology for the formation of an optimal set of spare tools.

Methods. The totality of spare equipment in the organizational and technological system for providing mechanical assembly based on threaded connections at the enterprises of the motor-car construction cluster is presented in the work on the basis of a set-theoretical approach. Also, to describe the totality of spare equipment, theoretical and multiple models of the whole set of spare assembly tools, devices and the amount of spare parts for this equipment are used. The description of organization features of the repair service in the organizational and technological system for providing mechanical assembly at the enterprises of the motor-car construction cluster was carried out applying the principles and concepts of management theory. The formalization of the decision-making process for the formation of a set of spare equipment is based on the methods of decision-making theory. Some elements of the methodology are based on the use of methods of mathematical analysis and the theory of fuzzy sets.

Results. A set-theoretic model of a set of spare assembly tools, devices, fixtures and spare parts has been proposed. The structure and decision-making process for the formation of a set of spare assembly tools, devices, fixtures and spare parts have been described. A methodology and algorithm for creating an optimal set of spare tools, devices, and spare parts have been proposed. The methodology and algorithm take into account the statistical parameters of equipment failures and make it possible to optimize the costs of purchasing assembly equipment, control and verification equipment and spare parts for them.

Conclusion. The developed models of a set of spare assembly tools, devices, fixtures and spare parts, and the methodology and algorithm for creating the optimal set of spare assembly tools, devices, fixtures and spare parts make it possible to simplify management work at an enterprise of the motor-car construction cluster. The developed models, methodology and algorithm reduce the negative impact of factors related to the insufficient level of

knowledge of decision makers and solve the problem of optimal management of the subsystem of spare tools, devices, fixtures and spare parts included in the organizational and technological system of mechanical assembly.

Keywords: *management system; organizational and technological support of production; motor-car construction cluster.*

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

For citation: Averchenkova E. E., Shabanov A. A. The Methodology for Creating the Optimal Set of Spare Equipment in the Organizational and Technological System for Providing Mechanical Assembly at the Enterprises of the Motor-Car Construction Cluster. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 201-219 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-201-219>.

Received 04.10.2021

Accepted 29.11.2021

Published 20.12.2021

Введение

Важной целью при организации ритмичного функционирования предприятия автомобилестроительного кластера, обеспечивающего снижение потерь, является планирование оптимальной величины аварийных запасов запасного оборудования и запасных частей. Аварийный запас элементов совокупности сборочного оборудования (ССО), элементов совокупности оборудования контроля и поверки (ОКП) и запасных частей к ним играет особенно важную роль в крупных организационно-технологических системах обеспечения механической сборки на основе резьбовых соединений на предприятиях автомобилестроительного кластера (СОМС), а также на предприятиях с похожей системой организации сборочного производства. Практика показывает, что в крупных СОМС, где количество элементов ССО насчитывает несколько тысяч штук, практически ежедневно выходят из строя какие-либо инструменты из состава ССО или ОКП, и для поддержания бесперебойного функционирования системы необходимо иметь в

наличии запасное оборудование на случай быстрой замены. Однако содержание больших запасов промышленного инструмента приводит к сокращению финансового оборота предприятия за счет расходов, обеспечивающих хранение и содержание запасов. Это противоречие приводит к необходимости формирования оптимального размера совокупности запасных сборочных инструментов, приборов, приспособлений и запасных частей (ЗИП).

В данной области практических и научных интересов можно отметить работы Черкесова Г.Н. [1,2], в которых представлена методология оптимального формирования запасных частей и приборов применительно к приборостроительной отрасли. Эти исследования могут быть частично адаптированы к исследуемой области. Проблематика оптимизации количества запасных элементов технических систем рассматривалась в работы и других отечественных ученых [3-6].

Вопросы разработки сборочных технологических процессов, расчета пара-

метров сборочного оборудования и затяжки резьбовых соединений рассматривались в работах [7,8]. Однако в современных исследованиях отсутствует методика формирования оптимальной совокупности запасных инструментов, приборов, приспособлений и запчастей для предприятий автомобилестроительного кластера. Особенности достижений иностранных исследований в области сборки на основе резьбовых соединений, в т.ч. на основе автоматизированных сборочных производств представлен в работах [9-13]. Специфика иностранных разработчиков в сфере ремонта, технического обслуживания и управления запасами запасных частей и оборудования представлена в работах [14-19] подтверждает вышесказанное.

Отметим, что в данной работе применяется научный подход, развиваемый в т.ч. учеными ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова [20], который позволяет формализовать системы управления подсистемами организационно-технологической системы обеспечения механической сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера с позиции теории управления. Ранее авторами проводились научные исследования по разработке методик оптимального управления различными элементами СОМС [21, 22]. В данной статье авторами развиваются идеи, заложенные, в том числе в работе [22], на основе которых предлагается методика формирования оптимальной совокупности запасных инструментов, приборов, приспособлений и запасных частей.

Материалы и методы

СОМС рассматривается как сложная система, объединяющая три подсистемы [21, 22]. Функционально в СОМС выделяются составные части (подсистемы), среди которых, помимо собственно подсистемы сборочного оборудования, используемого в производстве (ПСО), есть подсистема оборудования контроля и поверки (ПКП), которое включает в себя средства измерения, предназначенные как для периодической поверки и калибровки применяемых сборочных инструментов, так и для выборочного контроля затянутых соединений. Кроме того, к СОМС относится и складское хозяйство, включающее необходимый для обеспечения ритмичного производства запас оборудования и запасных частей – подсистема запасных сборочных инструментов, приборов, приспособлений и запасных частей (ПЗИП).

Параметры отказов оборудования СОМС, могут отличаться в зависимости от условий работы. Например, практика показывает, что частота отказов одной и той же модели сборочного инструмента, работающей в разных условиях, может сильно отличаться. Частота отказов может зависеть от технологических приспособлений, применяемых в процессе, от квалификации обслуживающего персонала и других субъективных факторов.

Наряду с единицами оборудованияЗИП обычно включает в себя и отдельные составные части единиц оборудо-

вания. Обычно необходимость в формировании собственного склада ЗИП составных частей СОМС на предприятии возникает только при наличии ремонтной службы на предприятии. Если ремонт отказавшего оборудования осуществляется подрядными организациями, то формирование запаса отдельных запасных частей является их задачей. Важным моментом в вопросе формирования структуры ЗИП является обеспечение производства ремонтной службой, осуществляющей ремонт отказавших запасных частей и единиц оборудования. Пополнение совокупности ЗИП оборудования происходит путем ремонта отказавшего оборудования в ремонтной службе. Работоспособные элементы отказавших единиц оборудования также могут использоваться в качестве запасных частей. Также ЗИП пополняется за счет сборочных инструментов, приборов и приспособлений, ставших по разным причинам ненужными в производстве. Если во время хранения в ЗИП обнаруживается неисправность инструментов или принадлежностей, то они так же, как и отказавшие единицы оборудования, используемые в производстве, отправляются для ремонта в ремонтную службу.

В роли ремонтной службы может выступать либо мастерская по ремонту элементов СОМС, расположенная на предприятии, к которому относится рассматриваемая СОМС, либо одна или несколько подрядных организаций, которые могут осуществлять ремонт обо-

рудования. Обычно, различные подрядные организации занимаются обслуживанием и ремонтом оборудования различных типов и различных производителей. Для выполнения ремонта необходимо иметь ремонтные ЗИП, технологическое оснащение (измерительные приборы, инструменты, принадлежности и т.п.), ремонтный персонал. Наличие службы для ремонта элементов СОМС является важным, т.к. стоимость многих элементов СОМС весьма высока, поэтому вопрос возможности их восстановления посредством ремонта является одним из основных при эксплуатации СОМС. В связи с высокой стоимостью оборудования пополнение запасов инструментов и узлов путем ремонта отказавшего оборудования также является экономически целесообразным.

Представим модель совокупности ЗИП следующим образом:

$$STP=\{ST,SP\}, \quad (1)$$

где STP – совокупность ЗИП; ST – совокупность запасных инструментов, приборов и приспособлений; SP – совокупность запасных частей к оборудованию.

Введем модель совокупности запасных инструментов, приборов и приспособлений:

$$ST=\{ST_{\delta}|\delta=1\dots x\}, \quad (2)$$

где ST_{δ} – δ -й элемент совокупности запасных инструментов и приборов и приспособлений (эти элементы предназначены для быстрой замены отказавших элементов совокупностей сборочного оборудования и оборудования контроля и поверки); x – величина

множества элементов совокупности запасных инструментов, приборов и приспособлений, $x \in N$.

Предложим модель совокупности запасных частей к оборудованию:

$$SP = \{SP_\varepsilon | \varepsilon = 1 \dots y\}, \quad (3)$$

где SP_ε – ε -й элемент совокупности запасных частей инструментов и приборов. Запасные части, предназначены для замены при ремонте отказавших деталей элементов совокупностей сборочного оборудования и оборудования контроля и поверки; y – величина множества элементов совокупности запасных частей, $y \in N$.

Управление организационно-технологической системой обеспечения механической сборки предполагает формализацию соответствующего процесса принятия решений. Разработанный авторами процесс принятия решения по формированию совокупности ЗИП состоит из следующих этапов:

1. Анализ совокупности ЗИП с учетом целевых ориентиров штаб-квартиры локального предприятия автомобилестроительного кластера – ЗИП должно обеспечивать своевременную замену вышедшего из строя оборудования и организацию его ремонта.

2. Формирование критериев оптимальности для ЗИП:

- 2.1. Совокупность запасного оборудования (инструментов, приборов и приспособлений) должна содержать оптимальное количество элементов, обеспечивая

своевременную замену вышедших из строя элементов совокупности сборочного оборудования и элементов совокупности оборудования контроля и поверки; с учетом поправочных коэффициентов, обеспечивающие оптимальное для конкретного автомобилестроительного производства количество соответственно для сборочного оборудования и оборудования контроля и поверки.

- 2.2. Совокупность запасных частей инструментов, приборов и приспособлений должна содержать оптимальное количество запасных частей, обеспечивая ремонт вышедших из строя элементов совокупности сборочного оборудования и совокупности оборудования контроля и поверки; с учетом поправочных коэффициентов, обеспечивающих оптимальное для конкретного автомобилестроительного производства количество запасных частей соответственно для сборочного оборудования и оборудования контроля и поверки.

- 2.3. Критерий согласования решения – цена запасного оборудования и запасных частей должна быть в установленных штаб-квартирой пределах.

3. Формирование альтернативных решений о формировании совокупности ЗИП.

4. Выбор наилучшего решения о формировании совокупности ЗИП с учетом предложенных авторами критериев оптимальности, методики и алгоритма.

5. Принятие решения о формировании совокупности ЗИП и его согласова-

ние с вышестоящим руководством. Основой для согласования принятого решения руководством является критерий согласования принятого решения.

6. Реализация решения о формировании совокупности ЗИП.

7. Оценка полученных результатов, корректировка при необходимости – вся эта информация о вновь сформированной совокупности ЗИП поступает в базу данных корпорации, где хранится, анализируется. Полученный опыт используется на новых и существующих предприятиях автомобилестроительных кластеров для формирования новых и изменения существующих совокупностей ЗИП.

В табл. 1 представлены основные этапы методики формирования совокупности запасных инструментов, приборов, приспособлений и запасных частей на предприятии автомобилестроительного кластера.

Для оптимального формирования совокупности запасных инструментов, приборов, приспособлений и запасных частей нужно избегать равномерных трат на ЗИП для всех единиц оборудования системы. Обычно в автомобилестроительных корпорациях количество запасных сборочных инструментов берется в пропорции от общего количества инструментов, не принимая во внимание вероятности их выхода из строя, которые могут быть оценены посредством анализа экспертного мнения или статистических данных. При заказе запасных частей (в случае наличия на предприятии ремонтной службы) также обычно происходит первоначальный заказ всего комплекта деталей, из которых состоит изделие, без учета ограничивающих элементов.

Таблица 1. Методика формирования оптимальной совокупности запасных инструментов, приборов, приспособлений и запасных частей на предприятии автомобилестроительного кластера

Table 1. Methodology for creation the optimal spare tools, devices, accessories and spare parts set

Этап методики / Methodology stage	Содержание этапа / Stage content	Применяемые методы / Methods applied
1. Определение наличия ремонтной службы на пред- приятии	Целесообразность наличия ремонтного органа на предприятии зависит от интенсивности работы предприятия и может изменяться в зависимости от интенсивности работы оборудования и его поломок	Методы теории управления; методы теоретико-множественного подхода; методы принятия решений; методы математического анализа; методы теории нечетких множеств

Этап методики / Methodology stage	Содержание этапа / Stage content	Применяемые методы / Methods applied
2. Выбор по критериям оптимальности	<p>2.1. При наличии информации о статистике отказов оборудования на аналогичном предприятии корпорации использовать анализ статистических параметров, в противном случае следует использовать метод экспертных оценок.</p> <p>2.2. По результатам анализа определить наиболее слабые места системы и направить финансовые средства на обеспечение ЗИП наиболее слабых мест системы, избегая равномерных трат на ЗИП для всех единиц оборудования системы.</p> <p>2.3. Сформировать совокупность запасных инструментов, приспособлений и запчастей на основании имеющейся статистики отказов или на основании экспертных оценок.</p> <p>2.4. Согласовать цену закупаемых запасных сборочных инструментов, приборов, приспособлений и запасных частей по критерию согласования принятого решения</p>	<p>Методы теории управления; методы теоретико-множественного подхода; методы принятия решений; методы математического анализа; методы теории нечетких множеств</p>
3. Оптимизация совокупности ЗИП с учетом необходимости резервирования	Для повышения надежности работы ССО, на предприятиях с большим объемом выпуска продукции, где ССО насчитывает не менее нескольких тысяч сборочных инструментов, применяется резервирование	

Определим, что любая i -я единица оборудования совокупности сборочного оборудования или оборудования контроля и поверки может быть представлена как множество деталей (или узлов), из которых она состоит: $V_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{il}, \dots, v_{im}\}$, где V_i – i -я единица оборудования; $l=1 \dots m$ – количество различных артикулов деталей, из которых состоит i -я единица оборудования; v_{il} – количество деталей l -го артикула, входящих в состав i -й единицы оборудования.

При поломке оборудования происходит замена не всех деталей, входящих в состав единицы оборудования, а только некоторых. Поэтому нет необходимости закупать все детали, из которых состоит i -я единица оборудования, а для оптимальной организации ремонта надо закупить только выходящие из строя и заменяемые в ходе ремонта детали. При анализе статистических параметров отказов изделия большое внимание следует уделить тому, замене каких кон-

кретно деталей изделия приводят отказы. Авторами был сформирована последовательность действий, позволяющая оптимизировать совокупность ЗИП:

1. Анализ совокупности сборочного оборудования и выбор поставщиков запасного оборудования и запасных частей в соответствии с критерием согласования решения. Различные поставщики имеют различные цены на одни и те же запасные части для элементов СОМС. Также при выборе различных моделей оборудования, необходимо учитывать стоимость их последующего обслуживания, в том числе и закупку запасных частей. В качестве критерия согласования принятого решения вводятся заранее оговоренные штаб-квартирой пределы экономической стоимости решения, обеспечивающие прогнозирование стоимости принятого решения.

2. Определение общей структуры организации ремонта и складирования ЗИП на предприятии, включая присутствие ремонтной службы в структуре. Если ремонтная служба осуществляет ремонт отказавших изделий на предприятии, то перейти к пункту 3, если ремонт выполняют подрядные организации и ремонтная служба отсутствует в структуре, то перейти к пункту 6.

3. Если присутствует информация о статистике отказов, то перейти к пункту 4, если нет – то перейти к пункту 5.

4. Сформировать множество ЗИП запасных частей:

$$E_i(t) = \{\varepsilon_{i1}(t), \dots, \varepsilon_{il}(t), \dots, \varepsilon_{im}(t)\}, \quad (4)$$

где $E_i(t)$ – оптимальная совокупность запасных деталей i -й модели оборудования на интервале времени t ; $\varepsilon_{il}(t)$ – оптимальное количество запасных деталей l -го артикула для оборудования i -й модели оборудования на интервале времени t ; m – количество артикулов заменяемых при ремонте деталей i -й модели оборудования; t – определенный интервал времени, для которого рассчитывается необходимое количество запасных частей для ремонта оборудования i -й модели.

Отметим, что $\varepsilon_{il}(t)$ выбираются по результатам анализа статистических параметров, для всех l -х деталей i -й модели оборудования из условия:

$$\varepsilon_{il}(t) \geq \varepsilon_{\text{стат}_{il}}(t); \varepsilon_{il}(t) \in N, \quad (5)$$

где $\varepsilon_{\text{стат}_{il}}(t)$ – количество деталей l -го артикула, замененных при отказе изделия i -й модели за интервал времени t в предшествующий период эксплуатации.

5. Сформировать совокупность запасных частей

$$E_i(t) = \{\varepsilon_{i1}(t), \dots, \varepsilon_{il}(t), \dots, \varepsilon_{im}(t)\}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_{il}(t)$ выбираются по методу экспертных оценок специалистов, для всех l -го артикулов деталей i -й модели оборудования из условия:

$$\varepsilon_{il}(t) \geq \varepsilon_{\text{эксп}_{il}}(t); \varepsilon_{il}(t) \in N, \quad (7)$$

где $\varepsilon_{\text{эксп}_{il}}(t)$ – необходимое количество деталей l -го артикула для оборудования i -й модели на интервале времени t , полученное в результате экспертной оценки с использованием теории нечетких множеств.

6. Если присутствует информация о статистике отказов, то перейти к пункту 7, если нет – то перейти к пункту 8.

7. Сформировать ЗИП инструментов, приборов и приспособлений

$$\Theta(t) = \{\theta_1(t), \dots, \theta_k(t), \dots, \theta_n(t)\}, \quad (8)$$

где $\theta_i(t)$ выбираются по результатам анализа статистических параметров, для каждой i -й модели оборудования из условия:

$$\theta_i(t) \geq \theta_{i_стат}(t); \theta_i(t) \in N, \quad (9)$$

где $\theta_i(t)$ – оптимальное количество запасного оборудования i -й модели на интервале времени t ; t – определенный интервал времени, для которого рассчитывается необходимое количество оборудования i -й модели для замены отказавшего оборудования; $\theta_{i_стат}(t)$ – количество отказавших изделий i -й модели за интервал времени t , которое может быть определено на основе статистических данных.

8. Сформировать ЗИП инструментов, приборов и приспособлений

$$\Theta(t) = \{\theta_1(t), \dots, \theta_k(t), \dots, \theta_n(t)\}, \quad (10)$$

где $\theta_i(t)$ выбираются по методу экспертных оценок, для каждой i -й модели инструмента из условия:

$$\theta_i(t) \geq \theta_{i_эксп}(t); \theta_i(t) \in N, \quad (11)$$

где $\theta_{i_эксп}(t)$ – необходимое количество запасных единиц i -й модели оборудования на интервале времени t , полученное в результате экспертной оценки.

9. Если присутствует необходимость резервирования, то перейти к пункту 10, если нет – то перейти к пункту 11.

10. Определение совокупности резервных инструментов:

$$DR = \{DR_1, DR_2, \dots, DR_s, \dots, DR_n\}, \quad (12)$$

где $s=1 \dots n$ – множество моментов затяжки; DR_s – резервный инструмент, настроенный на s -й момент затяжки; DR – совокупность резервных сборочных инструментов.

11. Конец.

Результаты и их обсуждение

Разработанная последовательность действий может быть представлена в виде алгоритма на рис.1.

Рассмотрим практическое использование разработанной методики формирования оптимальной совокупности запасных инструментов и запчастей. Например, если в ССО используется 40 инструментов 1-й модели ценой 10000 у.е. и 20 инструментов 2-й модели ценой 5000 у.е., то в существующих системах, количество инструментов, находящихся на складе в резерве, обычно составляет 20% от числа инструментов, находящихся в эксплуатации, если это число превышает 10 штук. Таким образом, по общепринятой методике необходимо закупить на склад 8 инструментов модели №1 и 4 инструмента модели №2, потратив на это 100000 у.е. При применении метода экспертных оценок получены оценки $\theta_{1_эксп}(t)=4$, $\theta_{2_эксп}(t)=3$. Таким образом, на закупку оборудования с учетом мнения экспертов следует потратить 55000 у.е., что обеспечит экономию в $(100000-55000)/100000 \cdot 100\% = 45\%$.

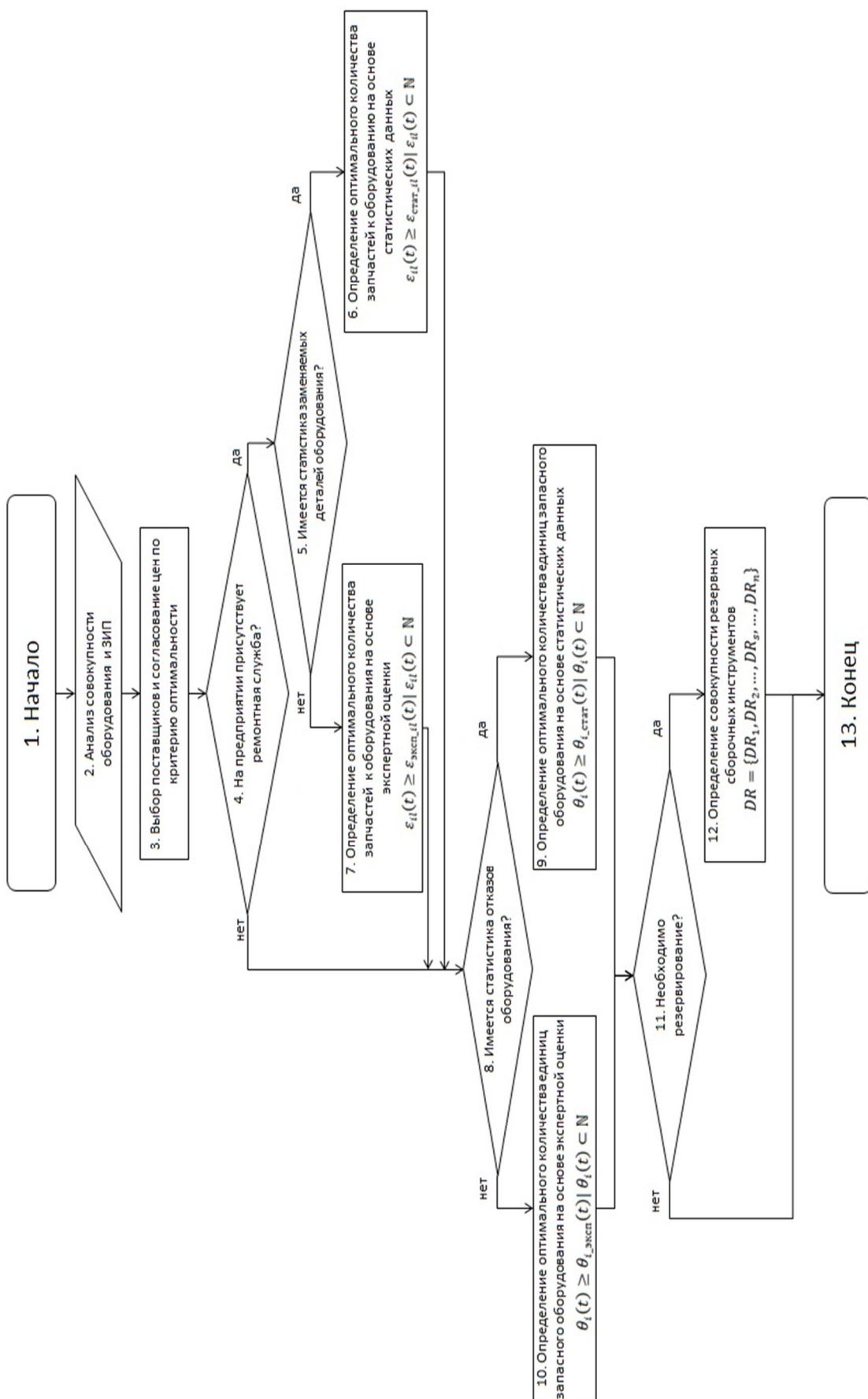


Рис. 1. Алгоритм формирования оптимальной совокупности запасных сборочных инструментов, приборов, приспособлений и запасных частей

Fig. 1. Algorithm for creation of optimal set of spare assembly tools, devices, accessories and spare parts

Наглядно практическое использование методики формирования оптималь-

ной совокупности запасных сборочных инструментов показано в табл. 2.

Таблица 2. Пример практического использования методики формирования оптимальной совокупности запасных сборочных инструментов

Table 2. Example of the practical use of the methodology for creation of optimal spare assembly tools set

Модель оборудования / Equipment model	Общее количество единиц оборудования, шт / Total number of pieces of equipment, pcs	Цена модели оборудования, у.е. / The price of the equipment model, in c.u.	Количество запасных единиц оборудования, шт. / Number of spare equipment units, pcs		Стоимость запасных единиц оборудования, у.е. / The cost of spare pieces of equipment, units	
			Без использования предлагаемой методики / Without using the proposed methodology	При использовании предлагаемой методики / When using the proposed methodology	Без использования предлагаемой методики / Without using the proposed methodology	При использовании предлагаемой методики / When using the proposed methodology
№1	40	10 000	8	4	80 000	40 000
№2	20	5 000	4	3	20 000	15 000

Аналогично приведем пример для i -й модели инструмента, использующийся в ПСО в единичном количестве. Пусть он состоит из 10 разных деталей с неодинаковой стоимостью, причем состав инструмента определяется разным количеством деталей. Представим инструмент i -й модели в виде множества $V_i = \{1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1\}$, элементы которого обозначают количество деталей. Пусть цена деталей для i -й модели инструмента определяется кортежем $C_i = \langle 20; 30; 150; 10; 40; 170; 40; 50; 30; 60 \rangle$. В случае заказа всего комплекта деталей, что часто бывает на практике, получим общую сумму их стоимости: $20 + 30 + 150 + 10 \cdot 2 + 40 + 170 + 40 + 50 \cdot 2 + 30 + 60 = 660$ (у.е.).

Также следует отметить, что в случае наличия большего количества i -й модели инструментов, количество комплектов может быть большим.

Для сравнения приведем аналогичный расчет, основанный на применении метода экспертной оценки к определению необходимого количества деталей. Пусть $\varepsilon_{\text{эксп}_i1}(t) = 0$, $\varepsilon_{\text{эксп}_i2}(t) = 1$, $\varepsilon_{\text{эксп}_i3}(t) = 1$, $\varepsilon_{\text{эксп}_i4}(t) = 1$, $\varepsilon_{\text{эксп}_i5}(t) = 0$, $\varepsilon_{\text{эксп}_i6}(t) = 1$, $\varepsilon_{\text{эксп}_i7}(t) = 0$, $\varepsilon_{\text{эксп}_i8}(t) = 1$, $\varepsilon_{\text{эксп}_i9}(t) = 0$, $\varepsilon_{\text{эксп}_i10}(t) = 0$.

В этом случае стоимость комплекта деталей составит: $30 + 150 + 10 + 170 + 50 = 410$ (у.е.). Таким образом, экономия составит: $(660 - 410) / 660 \cdot 100\% = 38\%$.

Наглядно практическое использование методики формирования оптимальной совокупности запасных частей к оборудованию показано в табл. 3.

Таблица 3. Пример практического использования методики формирования оптимальной совокупности запасных частей

Table 3. An example of the practical use of the methodology for forming the optimal set of spare parts

Артикул детали / Item number	Цена детали, у.е. / Part price, in c.u.	Количество закупаемых деталей, шт. / Number of purchased parts, pcs.	Стоимость закупаемых деталей, у.е. / Cost of purchased parts, c.u.	Количество закупаемых деталей, шт. / Number of purchased parts, pcs.	Стоимость закупаемых деталей, у.е. / Cost of purchased parts, c.u.
		Без использования предлагаемой методики / Without using the proposed methodology		При использовании предлагаемой методики / When using the proposed methodology	
1	20	1	20	0	0
2	30	1	30	1	30
3	150	1	150	1	150
4	10	2	20	1	20
5	40	1	40	0	0
6	170	1	170	1	170
7	40	1	40	0	0
8	50	2	100	1	50
9	30	1	30	0	0
10	60	1	60	0	0

Разработанная методика и алгоритм формирования оптимальной совокупности запасных инструментов, приборов, приспособлений и запасных частей рекомендуются к применению на предприятиях автомобильной сборки, где парк сборочного оборудования насчитывает несколько тысяч штук сборочных инструментов десятков разных моделей от нескольких разных производителей. Также разработанную методику и алгоритм целесообразно применять и на предприятиях других отраслей с похожей структурой и составом СОМС.

Выводы

Задачами управления совокупностью ЗИП является эффективное распределение и использование финансовых ресурсов на закупку оборудования и запасных частей и прогнозирование и обеспечение успешного конечного результата формирования данной совокупности для центра, которым в данном случае является штаб-квартира корпорации, которой принадлежит предприятие автомобилестроительного кластера. Разработанные модели совокупности ЗИП, методика и алгоритм оптимального

формирования совокупности ЗИП позволяют упростить управленческую работу на предприятии автомобилестроительного кластера и сократить негативное влияние факторов, связанных с недостаточным уровнем знаний лиц, при-

нимающих решения и решить задачу оптимального управления подсистемой запасных инструментов, приборов, приспособлений и запасных частей, входящей в СОМС.

Список литературы

1. Черкесов Г.Н. Оценка надежности систем с учетом ЗИП. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 480 с.
2. Черкесов Г.Н. Проблема ЗИП и задача формирования нового раздела теории надежности восстанавливаемых систем // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2011. № 6-1 (138). С. 136-153.
3. Чуркин В.В. Оценка и оптимизация комплекта ЗИП с помощью метода статистического моделирования // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2015. № 2-3 (217-222). С. 79-92.
4. Макаркин Н.П. Экономическая оптимизация количества запасных элементов технических систем с учетом фактора надежности // Вестник Мордовского университета. 2016. Т. 26. № 4. С. 448-461.
5. Создание библиотеки оценки и расчета оптимальных запасов в комплектах ЗИП / П.Г. Новиков, А.М. Егоров, А.В. Царенко, И.П. Яковлев // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2016. № 19. С. 194-197.
6. Аверинцев М.Б., Корниенко Н.А., Колокольчикова Л.В. Оптимизация количества запасных элементов в сложном устройстве // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: сборник научных статей по итогам восьмой международной научной конференции. М., 2019. С. 56-58.
7. Чечуга А.О. Особенности разработки технологических процессов автоматизированной и роботизированной сборки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 9. С. 555-559.
8. Аббясов В.М., Бухтеева И.В., Бавыкин О.Б. Задачи выбора компоновки роботизированного технологического комплекса // Инженерный вестник Дона. 2015. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2756
9. Zhang Q., Xie Z., Liu Y., Liu H. () Development of Bolt Screwing Tool Based on Pneumatic Slip Ring. In: Yu H., Liu J., Liu L., Ju Z., Liu Y., Zhou D. (eds) // Intelligent Ro-

botics and Applications. ICIRA 2019. Lecture Notes in Computer Science, 2019, vol. 11740. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27526-6_40

10. Perween S., Zaheer A., Khalid R. (2013) Classification and Balancing of an Automotive Assembly Line. In: Qi E., Shen J., Dou R. (eds) // International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation (IEMI2012) Proceedings. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38445-5_44

11. Poparad H. (2017) Advanced Automotive Assembly Line Trends as Tools in Optimizing Production Line Performance. In: Chiru A., Ispas N. (eds) // CONAT 2016 International Congress of Automotive and Transport Engineering. CONAT 2016. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45447-4_65

12. Bedeoui A., Benhadj R., Trigui M., Aifaoui N. (2021) Evaluating Assembly Sequences with the Assembly Tools Operation Space Criteria. In: Kharrat M., Baccar M., Dammak F. (eds) Advances in Mechanical Engineering, Materials and Mechanics. ICAMEM 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52071-7_16

13. Mishra A., Deb S. (2016) An Intelligent Methodology for Assembly Tools Selection and Assembly Sequence Optimisation. In: Mandal D.K., Syan C.S. (eds) CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, New Delhi. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2740-3_31

14. Velmurugan R.S., Dhingra T. Asset Maintenance Strategic Plan for Operational Excellence. In: Asset Maintenance Management in Industry. International Series in Operations Research & Management Science. 2021. Vol. 310. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-74154-9_6

15. Velmurugan R.S., Dhingra T. Maintenance Strategy, Practices and Spare Parts Management // Asset Maintenance Management in Industry. International Series in Operations Research & Management Science. 2021, vol 310. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-74154-9_3

16. Wang Y., Zhou W., Zhao J., Wang M. (2021) A Computer Model for Decision of Equipment Maintenance Spare Parts Reserve. In: MacIntyre J., Zhao J., Ma X. (eds) The 2020 International Conference on Machine Learning and Big Data Analytics for IoT Security and Privacy. SPIOT 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1283. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62746-1_42

17. Zhang X., Zeng J. (2016) Joint Optimization of Condition-Based Repair-by-Replacement and Spare Parts Provisioning Policy with Random Maintenance Time and Lead Time. In: Qi E., Shen J., Dou R. (eds) Proceedings of the 22nd International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2015. Atlantis Press, Paris. https://doi.org/10.2991/978-94-6239-180-2_34

18. Basten R.J.I., van der Heijden M.C., Schutten J.M.J. et al. An approximate approach for the joint problem of level of repair analysis and spare parts stocking // *Ann Oper Res*, 2015, 224, 121–145. <https://doi.org/10.1007/s10479-012-1188-0>
19. Chen N., Ou L., Bai F. (2020) Research on Calculating Method of Repairable Spare Parts and Non-repairable Spare Parts. In: Duan B., Umeda K., Hwang W. (eds) *Proceedings of the Seventh Asia International Symposium on Mechatronics. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 588. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9437-0_16
20. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: Изд-во физико-математической литературы, 2012. 604 с.
21. Шабанов А.А. Решение задачи оптимизации частоты проверок параметров оборудовани // *Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая (ОТ)*. 2015. Вып. 10, 2015. С. 105-114.
22. Шабанов А.А. Разработка методики рационального выбора структуры и состава запаса сборочных инструментов и приспособлений для системы обеспечения механической сборки // *Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая (ОТ)*. 2015. Вып. 10, 2015. С. 115-124.

References

1. Cherkosov G.N. *Ocenka nadezhnosti sistem s uchetom ZIP* [Assessment of the reliability of systems taking into account spare parts]. Saint-Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2012. 480 p.
2. Cherkosov G.N. Problema ZIP i zadacha formirovaniya novogo razдела teorii nadezhnosti vosstanavliyaemyh sistem [The problem of spare parts and the problem of forming a new section of the theory of reliability of recoverable systems]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie = Scientific and Technical Statements of the St. Petersburg State Polytechnic University. Computer Science. Telecommunications. Control*, 2011, no. 6-1 (138), pp 136-153.
3. Churkin V.V. Ocenka i optimizaciya komplekta ZIP s pomoshch'yu metoda statisticheskogo modelirovaniya [Assessment and optimization of a set of spare parts and accessories using the method of statistical modeling] *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie = Scientific and Technical Statements of the St. Petersburg State Polytechnic University. Computer Science. Telecommunications. Control*, 2015, no. 2-3 (217-222), pp 79-92.
4. Makarkin N.P. Ekonomicheskaya optimizaciya kolichestva zapasnyh elementov tekhnicheskikh sistem s uchetom faktora nadezhnosti [Economic optimization of the number

of spare elements of technical systems taking into account the reliability factor] *Vestnik Mordovskogo universiteta = Bulletin of the Mordovian University*. 2016, vol. 26, no. 4, pp. 448-461.

5. Novikov P.G., Egorov A.M. and others Sozdanie biblioteki ocenki i rascheta optimal'nyh zapasov v komplektah ZIP [Creation of a library for evaluating and calculating optimal stocks in spare parts kits *Novye informacionnye tekhnologii v avtomatizirovannyh sistemah* — *New Information Technologies in Automated Systems*. 2016, no. 19, pp. 194-197.

6. Averincev M.B., Kornienko N.A., Kolokol'chikova L.V. [Optimization of the number of spare elements in a complex device] *Peredovye innovacionnye razrabotki. Perspektivy i opyt ispol'zovaniya, problemy vnedreniya v proizvodstvo. Sbornik nauchnykh statej po itogam vos'moj mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii* [Advanced innovative developments. Prospects and experience of use, problems of implementation in production. Collection of scientific articles on the results of the eighth international scientific conference]. Moscow, 2019, pp. 56-58 (In Russ.).

7. Chechuga A O Osobennosti razrabotki tekhnologicheskikh processov avtomatizirovannoj i robotizirovannoj sborki [Features of development of technological processes of automated and robotized assembly] *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula State University. Technical Science*, 2019, no. 9, pp. 555-559.

8. Abbyasov V.M., Bukhteeva I.V., Bavykin O.B. Zadachi vybora komponovki robotizirovannogo tekhnologicheskogo kompleksa [Problems of choosing the layout of a robotic technological complex]. *Inzhenernyj vestnik Dona – Engineering Bulletin of the Don*, 2015, no. 1. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2756

9. Zhang Q., Xie Z., Liu Y., Liu H. Development of Bolt Screwing Tool Based on Pneumatic Slip Ring. In: Yu H., Liu J., Liu L., Ju Z., Liu Y., Zhou D. (eds) *Intelligent Robotics and Applications. ICIRA 2019. Lecture Notes in Computer Science*, 2019, vol 11740. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27526-6_40

10. Perween S., Zaheer A., Khalid R. (2013) Classification and Balancing of an Automotive Assembly Line. In: Qi E., Shen J., Dou R. (eds). *International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation (IEMI2012) Proceedings*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38445-5_44

11. Poparad H. (2017) Advanced Automotive Assembly Line Trends as Tools in Optimizing Production Line Performance. In: Chiru A., Ispas N. (eds) *CONAT 2016 International Congress of Automotive and Transport Engineering*. CONAT 2016. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45447-4_65

12. Bedeoui A., Benhadj R., Trigui M., Aifaoui N. (2021) Evaluating Assembly Sequences with the Assembly Tools Operation Space Criteria. In: Kharrat M., Baccar M., Dammak F. (eds) *Advances in Mechanical Engineering, Materials and Mechanics*. ICAMEM

2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52071-7_16

13. Mishra A., Deb S. (2016) An Intelligent Methodology for Assembly Tools Selection and Assembly Sequence Optimisation. In: Mandal D.K., Syan C.S. (eds) CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, New Delhi. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2740-3_31

14. Velmurugan R.S., Dhingra T. Asset Maintenance Strategic Plan for Operational Excellence. In: *Asset Maintenance Management in Industry. International Series in Operations Research & Management Science*, 2021, vol 310. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-74154-9_6

15. Velmurugan R.S., Dhingra T. Maintenance Strategy, Practices and Spare Parts Management. In: *Asset Maintenance Management in Industry. International Series in Operations Research & Management Science*, 2021 vol 310. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-74154-9_3

16. Wang Y., Zhou W., Zhao J., Wang M. (2021) A Computer Model for Decision of Equipment Maintenance Spare Parts Reserve. In: MacIntyre J., Zhao J., Ma X. (eds) The 2020 International Conference on Machine Learning and Big Data Analytics for IoT Security and Privacy. SPIOT 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1283. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62746-1_42

17. Zhang X., Zeng J. (2016) Joint Optimization of Condition-Based Repair-by-Replacement and Spare Parts Provisioning Policy with Random Maintenance Time and Lead Time. In: Qi E., Shen J., Dou R. (eds) Proceedings of the 22nd International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2015. Atlantis Press, Paris. https://doi.org/10.2991/978-94-6239-180-2_34

18. Basten R.J.I., van der Heijden M.C., Schutten J.M.J. et al. An approximate approach for the joint problem of level of repair analysis and spare parts stocking. *Ann Oper Res*, 2015, 224, 121–145. <https://doi.org/10.1007/s10479-012-1188-0>

19. Chen N., Ou L., Bai F. (2020) Research on Calculating Method of Repairable Spare Parts and Non-repairable Spare Parts. In: Duan B., Umeda K., Hwang W. (eds) Proceedings of the Seventh Asia International Symposium on Mechatronics. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 588. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9437-0_16

20. Novikov D.A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [The theory of management of organizational systems]. Moscow, 2012, 604 p.

21. Shabanov A A Reshenie zadachi optimizatsii chastoty proverok parametrov oborudovaniya [Solution of the optimization problem of equipment parameters inspection frequency] *Voprosy radioelektroniki. Seriya obshchetekhnicheskaya (OT) = Questions of Radio Electronics. General Technical Series*, 2015, is. 10, pp. 105-114.

22. Shabanov A. A. Razrabotka metodiki racional'nogo vybora struktury i sostava zapasa sborochnykh instrumentov i prispособlenij dlya sistemy obespecheniya mekhanicheskoy sborki [Development of rational choice method of structure and composition of spare assembly tools and accessories for mechanical assembly system] *Voprosy radioelektroniki. Seriya obshchetechnicheskaya (OT) = Questions of Radio Electronics. General Technical Series*, 2015, is. 10, pp. 115-124.

Информация об авторах / Information about the Authors

Аверченкова Елена Эдуардовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Цифровая экономика», Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация, e-mail: lena_ki@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2098-6156>

Elena E. Averchenkova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Digital Economy Department, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation, e-mail: lena_ki@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2098-6156>

Шабанов Алексей Александрович, АО "Московское производственное объединение "Металлист", г. Москва, Российская Федерация, e-mail: aashabanov86@mail.ru

Aleksei A. Shabanov, JSC "Moscow Production Association" Metallist ", Moscow, Russian Federation, e-mail: aashabanov86@mail.ru

К сведению авторов

1. К публикации в журнале «Известия Юго-Западного государственного университета» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2. Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

- статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;

- разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа.

- сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);

- лицензионный договор.

3. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами.

4. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

5. Публикация бесплатная.

6. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны – 2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

7. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (строчные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, список литературы. Авторы, название, аннотация и ключевые слова, список литературы приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается аннотация (200-250 слов), отражающая краткое содержание статьи.

8. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.

9. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный – 12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс – 5 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора – 75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы (Ω , η , β , μ , ω , ν и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций (\sin , \cos , \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 10). Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 22-25-26, тел/факс (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Изменения и дополнения к правилам оформления статей и информацию об опубликованных номерах можно посмотреть на официальном сайте журнала: <https://science.swsu.ru>.