

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

**Юго-Западного
государственного университета**

**Серия: Управление, вычислительная
техника, информатика. Медицинское
приборостроение**

Научный журнал

Том 14 № 4 / 2024

Proceedings

**of the Southwest
State University**

**Series: Control, Computer Engineering,
Information Science. Medical
Instruments Engineering**

Scientific Journal

Vol. 14 № 4 / 2024



**Известия Юго-Западного
государственного университета.
Серия: Управление, вычислительная
техника, информатика. Медицинское приборостроение
(Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta.
Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika.
Meditsinskoe priborostroenie)**

Научный рецензируемый журнал

Основан в 2011 г.

Цель издания – публичное представление научно-технической общественности научных результатов фундаментальных, проблемно-ориентированных научных исследований в таких областях, как информационные и интеллектуальные системы, мехатроника и робототехника, распознавание и обработка изображений, системный анализ и принятие решений, моделирование в медицинских и технических системах, приборы и методы контроля природной среды.

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:

2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки).

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки).

2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки).

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки).

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки).

2.3.8. Информатика и информационные процессы (технические науки).

3.3.9. Медицинская информатика (медицинские науки).

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Емельянов Сергей Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, ректор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Томакова Римма Александровна, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Агарков Николай Михайлович, д-р мед. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия)

Гонтарев Сергей Николаевич, д-р мед. наук, профессор, Белгородский государственный национальный исследовательский университет (г. Белгород, Россия)

Будневский Андрей Валериевич, д-р мед. наук, профессор, Воронежский государственный медицинский университет им. Н. Н. Бурденко Минздрава России (г. Воронеж, Россия)

Зайченко Кирилл Владимирович, д-р техн. наук, профессор, Институт аналитического приборостроения Российской академии наук (г. Санкт-Петербург, Россия)

Зо Зо Тун, канд. техн. наук, профессор, Военный институт сестринских и парамедицинских наук (г. Янгон, Мьянма)

Истомина Татьяна Викторовна, д-р техн. наук, профессор, Московский государственный гуманитарно-экономический университет (г. Москва, Россия)

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

Коровин Евгений Николаевич, д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Россия)

Маслак Анатолий Андреевич, д-р техн. наук, профессор, Кубанский государственный университет (г. Краснодар, Россия)

Подмастерьев Константин Валентинович, д-р техн. наук, профессор, Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева (г. Орел, Россия)

Разинкин Константин Александрович, д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Россия)

Риад Таха Аль-Касасбех, д-р техн. наук, профессор, Университет Аль-Балка (г. Амман, Иордания)

Серегин Станислав Петрович, д-р мед. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия)

Таныгин Максим Олегович, д-р техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия)

Тарасов Сергей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Южный Федеральный университет (г. Ростов-на-Дону, Россия)

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

Филист Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия)

Филонович Александр Владимирович, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия)

Чернов Николай Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Южный Федеральный университет (г. Ростов-на-Дону, Россия)

Чопоров Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Россия)

Шаталова Ольга Владимировна, д-р техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия)

Якунченко Татьяна Игоревна, д-р мед. наук, профессор, Белгородский государственный национальный исследовательский университет (г. Белгород, Россия)

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Адрес учредителя, издателя и редакции:

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 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 №ФС77-82285 от 23.11.2021).

ISSN 2223-1536 (Print)

Префикс DOI: 10.21869

Сайт журнала: <https://swsu.ru/izvestiya/seriesivt/>

© Юго-Западный государственный университет, 2024



Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:

Полиграфический центр

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

Подписка и распространение:

журнал распространяется по подписке.

Подписной индекс журнала 44288 в объединенном каталоге «Пресса России».

Периодичность: четыре раза в год

Свободная цена.

Оригинал-макет подготовлен О. А. Леоновой

Подписано в печать 27.12.2024. Формат 60×84/8.

Дата выхода в свет 30.12.2024

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 22,9.

Тираж 1000 экз. Заказ 71.

16+



**Proceedings of the Southwest State University.
Series: Control, Computer Engineering,
Information Science. Medical Instruments Engineering**

Peer-reviewed scientific journal

Published since 2011

These Proceedings present the results of scientific fundamental and applied research in such areas as information and intelligent systems; mechatronics, robotics; image recognition and processing; system analysis and decision making; simulation in medical and technical systems; devices and methods for monitoring the natural environment.

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:

2.2.4. Devices and methods of measurement (by type of measurement) (technical Sciences).

2.2.8. Methods and devices for monitoring and diagnosing materials, products, substances and the natural environment (technical Sciences).

2.2.12. Devices, systems and medical devices (technical Sciences).

2.2.15. Telecommunication systems, networks and devices (technical Sciences).

2.3.1. System analysis, management and information processing (by industry) (technical Sciences).

2.3.8. Informatics and information processes (technical sciences).

3.3.9. Medical informatics (medical sciences).

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

Rimma A. V. Tomakova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

EDITORIAL BOARD

Nikolai M. Agarkov, Dr. of Sci. (Medical), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

Oleg N. Choporov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)

Andrey V. Budnevsky, Dr. of Sci. (Medical), Professor, Voronezh State Medical University named after N. N. Burdenko (Voronezh, Russia)

Sergey A. Filist, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

Nikolay N. Chernov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia)

Alexander V. Filonovich, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

Sergei N. Gontarev, Dr. of Sci. (Medical), Professor,
Belgorod State National Research University
(Belgorod, Russia)

Tatiana V. Istomina, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Moscow State University of Humanities
and Economics (Moscow, Russia)

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

Evgeny N. Korovin, Dr. of Sci. (Engineering), Associate
Professor, Voronezh State Technical University
(Voronezh, Russia)

Anatoly A. Maslak, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Kuban State University (Krasnodar, Russia)

Konstantin V. Podmasteryev, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Orel State University named after I. S. Turgenev
(Orel, Russia)

Konstantin A. Razinkin, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Voronezh State Technical University
(Voronezh, Russia)

Stanislav P. Seregin, Dr. of Sci. (Medical), Professor,
Southwest State University (Kursk, Russia)

Maxim O. Tanygin, Dr. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Southwest State University
(Kursk, Russia)

Riad Taha Al-Kasasbeh, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Al-Balqa University (Amman, Jordan)

Olga V. Shatalova, Dr. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Southwest State University
(Kursk, Russia)

Sergey P. Tarasov, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southern Federal University
(Rostov-on-Don, Russia)

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

Tatiana I. Yakunchenko, Dr. of Sci. (Medical),
Professor, Belgorod State National Research University
(Belgorod, Russia)

Kirill V. Zaichenko, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Institute for Analytical Instrumentation
Russian Academy of Sciences (St. Petersburg, Russia)

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

Zo Zo Tun, Cand. of Sci. (Engineering), Professor,
Military Institute of Nursing and Paramedical Sciences
(Yangon, Myanmar)

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: (+74712) 22-25-26,

Fax: (+74712) 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
(PI №FS77-82285 of 23.11.2021).

ISSN 2223-1536 (Print)

DOI Prefix: 10.21869

Web-site: <https://swsu.ru/izvestiya/seriesivt/>

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 44288
in the General Catalogue “Pressa Rossii”

Frequency: Quarterly

Free price

Original lay-out design: O. A. Leonova

© Southwest State University, 2024

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

Signed for printing 27.12.2024. Format 60×84/8.

Release date 30.12.2024.

Offset paper. Printer's sheets: 22,9.

Circulation 1000 copies. Order 71.

16+

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ	8
Декодирование помехоустойчивого блокового кода в условиях априорной неопределенности	8
<i>Двилянский А. А., Юрлов А. В.</i>	
Метод контроля доступа и мониторинга соблюдения техники безопасности на энергетических хозяйствах предприятий на основе конвейерной нейросетевой модели	28
<i>Киселев А. В., Брусенцев Н. С., Кулешова Е. А., Ермаков Д. А.</i>	
Модель информационной системы для поддержки данными умных домашних помощников	47
<i>Калач А. В., Смоленцева Т. Е., Акатьев Я. А.</i>	
МЕХАТРОНИКА, РОБОТОТЕХНИКА.....	60
Модели и алгоритмы формирования задающих воздействий системы управления двухзвенной стопы реабилитационного экзоскелета.....	60
<i>Яцун С. Ф., Кисляк Л. Б., Савельева Е. В., Фурсов Г. А.</i>	
Применение ЭМГ для оценки эффективности и безопасности промышленного экзоскелета в трудовой деятельности	78
<i>Яцун А. С., Щербакова М. П., Мальчиков А. В.</i>	
РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ	98
Синтез технологий виртуальной реальности и компьютерного зрения в симуляторе промышленной радиографии	98
<i>Корчагин В. Д., Кувшинников В. С., Ковшов Е. Е.</i>	
Сравнительный анализ критериев диагностики классической кардиологии и кардиометрии	116
<i>Руденко М. Ю.</i>	
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ.....	129
Использование пеленгатора радиомаяков на беспилотном летательном аппарате в поисково-спасательных операциях	129
<i>Алемпьев М. Ю., Семенова А. Е., Коптев Д. С., Доебня В. Г., Лазарев А. С.</i>	
Организация data-центров: информационно-когнитивные аспекты.....	146
<i>Сизов А. С., Титенко Е. А., Халин Ю. А., Титенко М. А., Калинин Р. В.</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	164
Нечеткие модели для оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы у инженерно-технического персонала.....	164
<i>Корневский Н. А., Сафронов Р. И., Лукаш О. Ю., Родионова С. Н., Сипливый Г. В., Аксёнов В. В.</i>	
Нечеткие модели ранней диагностики неврозов, провоцируемых факторами риска инженерного труда.....	181
<i>Лукаш О. Ю., Сафронов Р. И., Родионова С. Н., Разумова К. В., Кныш О. А., Трусевич А. А.</i>	
К сведению авторов.....	197

CONTENT

INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS	8
Decoding forward error correction code in a priori uncertainty	8
<i>Dvilyanskiy A. A., Yurlov A. V.</i>	
A method for access control and monitoring compliance with safety regulations in energy facilities of enterprises based on a conveyor neural network model	28
<i>Kiselev A. V., Brusencev N. S., Kuleshova E. A., Ermakov D. A.</i>	
Model of an information system for data support of smart home assistants	47
<i>Kalach A. V., Smolentseva T. E., Akatyev Y. A.</i>	
MECHATRONICS, ROBOTICS	60
Models and algorithms for the formation of commanding influences of the control system of the rehabilitation exoskeleton two-link foot	60
<i>Jatsun S. F., Kislyak L. B., Saveleva E. V., Fursov G. A.</i>	
The use of EMG to assess the effectiveness and safety of an industrial exoskeleton in the workplace	78
<i>Yatsun A. S., Shcherbakova M. P., Malchikov A. V.</i>	
IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING	98
Synthesis of virtual reality and computer vision technologies in industrial radiography simulator	98
<i>Korchagin V. D., Kuvshinnikov V. S., Kovshov E. E.</i>	
Comparative analysis of diagnostic criteria of classical cardiology and cardiometry	116
<i>Rudenko M. Y.</i>	
SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING	129
Assessment of the possibility of using the direction finder of radio beacons on an unmanned aerial vehicle in search and rescue operations	129
<i>Alempiev M. Y., Semenova A. E., Koptev D. S., Dovbnya V. G., Lazarev A. S.</i>	
Building data centers: information and cognitive aspects	146
<i>Sizov A. S., Titenko E. A., Khalin Y. A., Titenko M. A., Kalinin R. V.</i>	
MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS	164
Fuzzy models for assessing the level of adaptive potential of the central nervous system in engineering and technical personnel	164
<i>Korenevsky N. A., Safronov R. I., Lukash O. Y., Rodionova S. N., Siplivy G. V., Aksenov V. V.</i>	
Fuzzy models of early diagnosis of neuroses provoked by risk factors of engineering labor	181
<i>Lukash O. Y., Safronov R. I., Rodionova S. N., Razumova K. V., Knysh O. A., Trusevich A. A.</i>	
Information for Authors	197

Декодирование помехоустойчивого блочного кода в условиях априорной неопределенности

А. А. Двилянский¹ ✉, А. В. Юрлов²

¹ МИРЭА – Российский технологический университет
пр-т Вернадского, д. 78, г. Москва 119454, Российская Федерация

² Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации
ул. Приборостроительная, д. 35, г. Орёл 302015, Российская Федерация

✉ e-mail: dvilyanskiy@mirea.ru

Резюме

Цель исследования – повышение эффективности декодирования помехоустойчивых блочных кодов в условиях априорной неопределенности относительно применяемых параметров.

Методы. В современных системах отмечается применение помехоустойчивых блочных кодов с большой длиной кодового слова, что позволяет в процессе кодирования достаточно далеко разнести друг от друга разрешенные кодовые комбинации и получить при итеративном декодировании возможность их правильного определения при низких значениях отношения сигнал / шум в канале связи. Использование длинных помехоустойчивых кодов требует сокращения сложности алгоритмов коррекции ошибок, оцениваемой числом операций различного типа на одну итерацию декодирования. Число операций различного типа будет зависеть от параметров кода и проверочной матрицы, а также применяемого алгоритма декодирования. Практическая реализация декодера имеет ряд ограничений, и его проектирование представляет сложную задачу, особенно в условиях априорной неопределенности относительно применяемых параметров кода. Для решения этой задачи предлагается использовать метод определения применяемой проверочной матрицы ЛБК на основе анализа принимаемой цифровой последовательности.

Результаты. В ходе исследования был проведен сравнительный анализ известных методов определения параметров помехоустойчивого блочного кода и предложена модификация метода Гаусса для решения системы линейных алгебраических уравнений при нахождении проверочной матрицы ЛБК.

Заключение. Предложенный метод позволяет избежать выполнения строгой последовательности действий согласно известному методу Гаусса, а также сократить временную сложность за счет распараллеливания вычислений и значительно увеличить эффективность практической реализации алгоритма нахождения проверочной матрицы ЛБК.

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование; определение проверочной матрицы; метод Гаусса; метод четырех русских.

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

Для цитирования: Двилянский А. А., Юрлов А. В. Декодирование помехоустойчивого блочного кода в условиях априорной неопределенности // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 4. С. 8–27. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-8-27>

Поступила в редакцию 06.10.2024

Подписана в печать 04.11.2024

Опубликована 27.12.2024

Decoding forward error correction code in a priori uncertainty

Alexei A. Dvilyanskiy¹ ✉, Alexander V. Yurlov²

¹MIREA – Russian Technological University
78 Vernadsky Ave., Moscow 119454, Russian Federation

²Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation
35 Priborostroitel'naya Str., Orel 302015, Russian Federation

✉ e-mail: dvilyanskiy@mirea.ru

Abstract

The purpose of research is to increase the efficiency of decoding noise-resistant block codes in conditions of a priori uncertainty about the parameters used.

Methods. In modern systems, the use of noise-resistant block codes with a large codeword length is noted, which allows the permitted code combinations to be sufficiently far apart from each other during encoding and to obtain, during iterative decoding, the possibility of their correct determination at low values of the signal-to-noise ratio in the communication channel. The use of long noise-tolerant codes requires a reduction in the complexity of error correction algorithms, which is estimated by the number of operations of various types per decoding iteration. The number of operations of various types will depend on the parameters of the code and the verification matrix, as well as the decoding algorithm used. The practical implementation of the decoder has a number of limitations, and its design is a difficult task, especially in conditions of a priori uncertainty about the applied code parameters. To solve this problem, it is proposed to use the method of determining the applied LBC verification matrix based on the analysis of the received digital sequence.

Results. In the course of the study, a comparative analysis of known methods for determining the parameters of an interference-resistant block code was carried out and a modification of the Gauss method was proposed to solve a system of linear algebraic equations when finding the LBC verification matrix.

Conclusion. The proposed method avoids performing a strict sequence of actions according to the well-known Gauss method, as well as reducing time complexity by paralleling calculations and significantly increasing the efficiency of practical implementation of the algorithm for finding the LBC verification matrix.

Keywords: noise-resistant coding; determination of the verification matrix; Gauss method; four-Russian method.

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

For citation: Dvilyanskiy A.A., Yurlov A.V. Decoding forward error correction code in a priori uncertainty. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2024;14(4):8–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-8-27>

Received 06.10.2024

Accepted 04.11.2024

Published 27.12.2024

Введение

В настоящее время применение процедур помехоустойчивого кодирования является неотъемлемой частью любой современной системы связи. Линейные блочные коды – это класс помехоустойчивых кодов, операция кодирования для которых состоит в разбиении последовательности информационных символов на блоки фиксированной длины k , каждому из которых сопоставляется строго определенное кодовое слово длины n , при этом формируемые кодовые слова не зависят друг от друга.

Совокупность кодовых слов образуют линейное пространство. Для описания линейного блочного кода (ЛБК) достаточно задать базис пространства, а кодирование сводится к умножению на порождающую матрицу. Порождающей матрицей G линейного (n, k) -кода называется матрица размера $k \times n$, строками которой являются его базисные векторы. Чтобы декодировать ЛБК, необходимо определить проверочную матрицу H , строки которой ортогональны к строкам матрицы G . Можно сказать, что элементами систематической формы проверочной матрицы являются коэффициенты проверочных уравнений, на основе которых вычисляются проверочные символы [1].

Особый интерес в настоящее время среди известных линейных блочных кодов представляют низкоплотные коды (НПК), задаваемые с помощью проверочной матрицы H , характеризующейся относительно малым числом

единиц в строках и столбцах. Их широкое применение на практике обусловлено возможностью почти вплотную приблизиться к пропускной способности канала при относительно небольшой сложности реализации [1].

Благодаря своей корректирующей способности низкоплотные коды (*LDPC – Low-Density Parity-Check Codes*) стали частью современных телекоммуникационных стандартов, таких как *DVB-S2 (S2X)* [2], *WiMAX*, *Wi-Fi* [3], а также других стандартов современных радиосистем, прежде всего спутниковых и радиорелейных [4], для которых характерно применение методов адаптации к сложным условиям приема сигналов. Адаптация основывается на подстройке параметров модуляции и помехоустойчивого кодирования в зависимости от качества радиолинии [5], что в случае применения НПК требует разработки методов определения их параметров.

Широкое применение НПК на практике объясняется тем, что они обладают наилучшей помехоустойчивостью по сравнению с используемыми ранее помехоустойчивыми блочными кодами (Рида-Соломона, БЧХ, турбокодами и др.), а сложность декодирования НПК составляет $O(N)$. Высокая эффективность декодирования НПК обеспечивается оптимизацией структуры проверочной матрицы H [6].

В отличие от других линейных блочных кодов, имеющих строгий алгоритм синтеза кодов с заданными параметрами, для НПК существует множество способов построения [7].

Кодирование осуществляется приведением матрицы H к виду $H = [P^T | I_{n-k}]$, из которого можно получить порождающую матрицу в систематической форме $G = [I_k | P]$. Сложность кодирования с использованием матрицы G заключается в том, что подматрица P в общем случае не является разреженной.

Как правило, проверочные матрицы НПК, описанные в телекоммуникационных стандартах [7], определены для некоторого диапазона длин кодовых слов и скоростей кодирования. При введении дополнительных значений кодовых длин и скоростей при использовании методов адаптации в системах связи возникает задача определения проверочной матрицы НПК, необходимой при реализации процедуры декодирования [8].

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,l} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{u,1} & x_{u,2} & \cdots & x_{u,l} \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ y_{n+1} & y_{n+2} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{(u-1)n+1} & y_{(u-1)n+2} & \cdots & y_{un} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где X – матрица, элементы которой представляют собой последовательность повторяющихся детерминированных синхрослов SW длиной l бит; Y – матрица, элементы которой представляют собой, соответственно, последовательности случайных кодовых слов длиной n бит.

Данная структура цифрового потока будет наблюдаться только на периоде $l + n$ бит. Так как период цифрового потока изначально неизвестен, то благодаря вставке синхрослов SW он может быть определен путем вычисления веса

Материалы и методы

Для декодирования ЛБК требуется знание параметров кода: длины кодового слова, скорости кода, проверочной матрицы кода [9; 10], а также решение задачи синхронизации.

На практике решение задачи синхронизации на уровне кодовых слов ЛБК реализуется путем вставки на передающей стороне уникальной синхропоследовательности – синхрослова (*synchroword*, SW) после каждого кодового слова (или нескольких кодовых слов) [11]. Таким образом, появление синхрослова SW длиной l бит в цифровом потоке на входе канального декодера происходит периодически с периодом кратным длине l бит кодового слова.

Тогда цифровой двоичный поток, полученный на длине u периодов, можно представить в виде совокупности матриц X и Y :

столбцов матрицы X при инкрементировании значения периода. Если веса всех столбцов матрицы X по расстоянию Хемминга равны «0» или « u » (возможны незначительные отклонения в результате возникновения ошибок в канале связи), то принимается решение о нахождении синхрослова SW длиной l бит и значения длины кодового слова n бит. Определение значения длины k информационной части кодового слова определяется после дескремблирования цифрового потока.

Данное решение предполагает использование «жестких» решений с выхода демодулятора. При низких значениях отношения сигнал / шум (ОСШ) использование «мягких» решений позволит получить гораздо лучшие результаты [9].

Сигналы одинаковой энергии будут отображаться геометрическими векторами одинаковой длины, концы которых – сигнальные точки размещаются на поверхности гиперсферы радиуса \sqrt{E} , где E – энергия сигнала (для упрощения $E = 1$). Евклидово расстояние, характеризующее различие между сигналами, выражается через разность энергий сигналов:

$$d_{ij}^2 = \int_0^T [s_i(t) - s_j(t)]^2 dt = E_{ij}. \quad (2)$$

Пусть в канал передается последовательность ЛБК ($d \in \{0, 1\}$) с использованием двоичной фазовой манипуляции (*BPSK – binary phase-shift keying*), в результате чего на выходе демодулятора наблюдается сигнал s , принимающий два возможных значения: $s_1 s_1 = 1 + i$ и $s_2 = -1 + i$. Для случая квадратурной фазовой манипуляции (*QPSK – quadrature phase shift keying*) будут наблюдаться сигналы: $s_1 = 1 + i$, $s_2 = -1 + i$, $s_3 = -1 - i$ и $s_4 = 1 - i$.

Под воздействием аддитивного белого гауссова шума (АБГШ) w на входе приемника сигнал S искажается и принимается как $r = s + w$.

Величина r имеет нормальное распределение и для случая *BPSK* определяется функцией плотности вероятности:

$$P(r/d = 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(r+1)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

$$P(r/d = 1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(r-1)^2}{2\sigma^2}}. \quad (4)$$

Полагаем, что длина кодового слова n определена корректно. Так как в канале присутствуют помехи, то кодовые слова ЛБК принимаются с ошибками. Обозначим принимаемые кодовые слова следующим образом: r_1, r_2, \dots, r_u , где u – количество принятых кодовых слов; $r_i = (r_i^1, r_i^2, \dots, r_i^n)$, и $r_i^j \in \mathbf{R}$. «Мягкое» решение или, иначе говоря, логарифмическое отношение правдоподобия (ЛОП) обозначим следующим образом:

$$x_i^j = \ln \frac{P(d_i^j = 0 / r_i^j)}{P(d_i^j = 1 / r_i^j)} = -\frac{2r_i^j}{\sigma^2}.$$

Тогда $x_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^n)$ – вектор, содержащий мягкие решения для каждого символа кодового слова длиной n бит.

Под воздействием помех в канале связи на выходе демодулятора наблюдается искаженный сигнал $s : r = s + w$. Значения сигнала r , которые лежат вблизи вещественной оси или мнимой оси, являются малодостоверными и, как правило, приводят к ошибкам.

Число вычислительных операций может быть уменьшено за счет

предварительных жестких решений, формируемых из амплитуд логарифмов отношений правдоподобия (надежностей) для символов, полученных из канала [12]. Множество позиций с очень высокой надежностью может быть выявлено с помощью сравнения значений ЛОП на выходе канала с некоторым порогом. Если надежность символа из канала превышает заданный порог, то соответствующая ему кодовая вершина фиксируется как жесткое решение. Вместо вычислений позиция символа помечается, указывая на высокую надежность значения этого символа. Вследствие этого выполняется меньший объем вычислений, так как для символа с высокой надежностью нет необходимости вычисления значений ЛОП.

Определив порог принятия решения, при анализе столбцов матрицы X наименее достоверные значения должны быть отброшены из дальнейшего рассмотрения. Для случая $QPSK$ порог принятия решения g_i определяется следующим образом:

$$g_i = \max_{i=1,2,3,4} \left\{ |r_j - s_i| \right\}. \quad (5)$$

Алгоритмы декодирования, использующие «мягкие» решения демодулятора, обладают большей вычислительной сложностью, но их применение дает дополнительный выигрыш при декодировании аналогичных кодов (кодов с одной и той же избыточностью) по сравнению алгоритмами, которые используют «жесткие» решения [13].

При использовании «мягких» решений значения с выхода демодулятора квантуются с конечной точностью (т. е. представляются конечным числом бит). Другая причина более высокой сложности использования «мягких» решений связана с необходимостью вычисления апостериорных вероятностей для кодовых символов. Однако усложнение реализации окупается потенциальным повышением эффективности системы кодирования – получением энергетического выигрыша от кодирования [14].

Низкоплотностные коды являются одним из наиболее востребованных решений в современных системах связи. Это объясняется тем, что декодирование НПК [6; 15] с большой длиной кодового слова за счет применения итеративных алгоритмов декодирования *SISO* (*Soft Input – Soft Output*) позволяет получить показатели, близкие к границе Шеннона [16]. Идея *SISO* заключается в улучшении исправляющей способности по максимуму апостериорной информации от итерации к итерации, от «мягкого» выхода одного декодера к «мягкому» входу, следующего в применяемой каскадной конструкции [14].

Низкоплотностный код – это линейный блочный код (ЛБК) с разреженной проверочной матрицей H и большой длиной кодового слова n . Проверочная матрица H для кода с параметрами (n, k) имеет размерность $(n-k) \times n$ и имеет низкую плотность единиц. Свойства матрицы H можно сформулировать следующим образом:

– проверочная матрица представляет собой систему $m \geq n - k$ проверочных уравнений;

– любая пара строк или столбцов имеет максимум λ общих ненулевых позиций.

Очень низкая плотность единиц ($i < m$ и $j < n$) позволяет значительно снизить вычислительные затраты на реализацию алгоритма декодирования при большой длине кодового слова.

В процессе декодирования используется изначально априорные вероятности входных символов, формируя дополнительную информацию в виде значений логарифмического отношения правдоподобия, которые являются мерой надёжности жёсткого решения декодера.

Известно, что получение больших уровней помехоустойчивости всегда связано с применением довольно длинных кодов, т. к. это позволяет достаточно далеко разнести друг от друга разрешенные кодовые комбинации, что и будет обеспечивать их правильное определение декодером. При этом использование весьма длинных кодов требует максимального упрощения алгоритмов коррекции ошибок с целью их достаточно быстрой и эффективной обработки [16; 17].

Для оценки сложности алгоритма декодирования используется методика, учитывающая требуемое число операций различного типа (сложения, умножения,

сравнения и т. д.) на одну итерацию декодирования [16]. Число операций различного типа будет зависеть от параметров кода и проверочной матрицы, а также применяемого алгоритма декодирования.

Для декодирования НПК широкое применение получил алгоритм итеративного распространения доверия (*IBP – Iterative Believe Propagation*) и его модификации. Практическая реализация НПК-декодеров имеет ряд ограничений, и их проектирование представляет сложную задачу [6].

Рассмотрим линейный (n, k) код C , который образует k -мерное подпространство в $F^n = GF(q)$, где $q = 0, 1, \dots, p$ – простое число. Матрица, строки которой являются базисными векторами пространства, образующего код C , является порождающей матрицей кода G . Множество строк матрицы G порождает линейный (n, k) код C , а любое кодовое слово образуется линейной комбинацией строк из G . В большинстве случаев порождающая матрица данного кода не является единственной. В [14; 18] представлено выражение для расчета количества возможных матриц для линейного кода $C(n, k)$:

$$M_{\text{возм. матриц}} = \prod_{i=0}^{k-1} (2^k - 2^i). \quad (6)$$

На рисунке 1 представлена зависимость количества возможных матриц кода от длины и скорости.

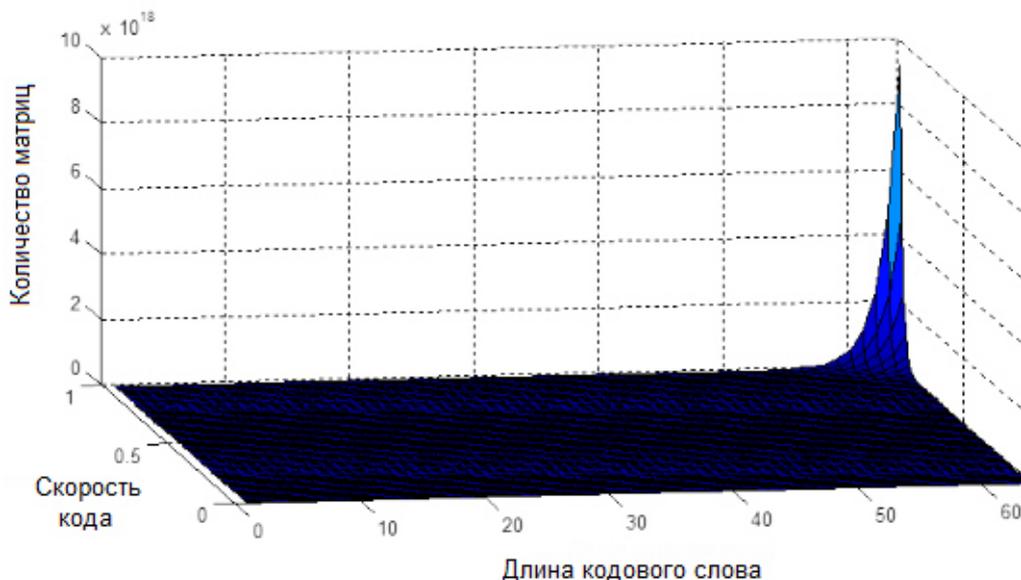


Рис. 1. Зависимость количества возможных матриц кода от длины и скорости кода

Fig. 1. Matrix-candidates dependency on code length and code rate

Среди известных [19] на сегодняшний день подходов к решению задачи определения параметров помехоустойчивого кода и нахождения системы проверочных уравнений (проверочной матрицы) можно выделить следующие: метод полного перебора, статистический метод, алгебраический метод [20].

Статистический метод – метод определения параметров кода, представляющий собой частный случай метода полного перебора и основанный на анализе результатов рассчитанных синдромов кодовых слов, составленных из фрагмента исследуемого цифрового потока, для всего известного набора применяемых ЛБК [19; 21]. Данный метод позволяет идентифицировать известный код, тогда как метод полного перебора может быть применен для определения параметров неизвестного кода [22].

Суть данного метода заключается в последовательном пробном декодиро-

вании контрольной выборки, состоящей из принятых кодовых слов (количество кодовых слов, необходимое для идентификации ЛБК, определяется вероятностью ошибки в канале), каждым из предполагаемых декодеров и анализе полученного множества решений декодера или анализе полученных при декодировании синдромов. Если в полученной последовательности с выхода декодера количество ненулевых синдромов больше заданного порога, то принимается решение о том, что выбранные параметры кода являются неправильными. Значение порога определяется путем применения критерия принятия решения, исходными данными для которого выступают допустимые вероятности ложной тревоги и пропуска цели. Метод предполагает, что известны проверочные матрицы, поэтому при анализе неизвестных видов кодирования данный метод не применим [20].

Метод полного перебора – метод определения проверочной матрицы кода путем перебора всех возможных проверочных уравнений и последующим нахождением синдромов рассматриваемых кодовых слов. Этот метод является общим случаем статистического метода определения параметров кода. Вычислительная сложность метода определяется количеством вариантов перебора в процессе определения проверочных уравнений ЛБК [18].

Количество вариантов значительно снижается в случае наличия априорных знаний о параметрах проверочной матрицы (вес строк, тип матрицы, размер циркулянта, расположение циркулянтов в проверочной части). В худшем случае, когда известны только параметры n и k кода, количество возможных проверочных уравнений определяется выражением

$$L_{\text{возм. уравнений}} = 2^k (n - k). \quad (7)$$

Количество возможных проверочных уравнений получено с учетом того, что они составят базис ортогонального дополнения из $(n - k)$ уравнений в канонической форме с единичной матрицей $I_{(n-k) \times (n-k)}$ в правой части и подматрицей $P_{(n-k) \times k}$, элементы которой могут располагаться произвольно.

Число вариантов перебора снижается при наличии каких-либо априорных знаний о формируемых проверочных уравнениях. Например, известно, что

циркулянты в проверочной части кодовых слов образуют дугициркулянтную структуру, а размер циркулянта равен l . Это означает, что проверочная матрица данного кода имеет квазидугициркулянтную структуру [23], все проверочные уравнения имеют постоянный вес r , проверочное уравнение содержит ровно $(r - 2)$ единиц в левой части проверочной матрицы и ровно две единицы в правой. Так как дугициркулянтные строки получены циклическим сдвигом некоторой «опорной» строки, задача сводится к поиску только «опорных» строк. Тогда количество возможных проверочных уравнений, определенное формулой (1), примет вид

$$\begin{aligned} L_{\text{возм. уравнений}} &= \frac{\binom{r-2}{k} \cdot \binom{n-k}{2}}{l} = \quad (8) \\ &= \frac{1}{l} \cdot \frac{(r-2)!}{(r-2-k)!k!} \cdot \frac{(n-k)!}{2!(n-k-2)!} \end{aligned}$$

В таблице 1 представлены расчетные значения количества вариантов проверочных уравнений и времени поиска ортогонального базиса для случая применения НПК со скоростью кодирования $1/2$ с различными длинами кодовых слов. Проверка принадлежности уравнения ортогональному базису осуществляется умножением на n кодовых слов и получением синдрома с низким весом по Хэммингу. Приведенные результаты получены с учетом возможности параллельного исполнения восьми потоков на ЭВМ с процессором *Intel(R) Core(TM) i5-8250U*.

Таблица 1. Время нахождения проверочных матриц НПК**Table 1.** Time to find parity matrices of LDPC

Длина кодового слова, бит	Количество вариантов перебора	Время перебора, лет
768	$6,5 \cdot 10^{13}$	866,54
1152	$7,5 \cdot 10^{14}$	9930,8875
1536	$4,3 \cdot 10^{15}$	55968,58
1920	$1,6 \cdot 10^{16}$	213893,7225

Анализ значений, представленных в таблице 1, показывает, что априорные знания о весе проверочных уравнений не позволяют найти проверочную матрицу НПК при использовании метода полного перебора за практически приемлемое время даже для относительно коротких длин кодовых слов.

Алгебраический метод – метод определения параметров кода, основанный на свойствах линейного векторного пространства кода, заключающийся в преобразовании матрицы, составленной из кодовых слов, к каноническому виду [11]. Данный подход является наиболее общим из всех известных.

Пусть линейный блочный код $C(n, k)$ однозначно задается порождающей матрицей $G_{k,n}$, а также получаемой из нее проверочной матрицей $H_{(n-k),n}$. Так как набор строк матрицы $G_{k,n}$ является базисом k -мерного подпространства C , образованного кодовыми словами линейного блочного кода (ЛБК) в n -мерном линейном пространстве, то, определив этот базис, можно идентифицировать ЛБК. В рамках задачи декодирования НПК в условиях априорной параметрической неопределенности, большой

интерес представляет ортогональное дополнение подпространства C , базис которого используется в качестве проверочной матрицы $H_{(n-k),n}$.

Основным требованием к алгебраическому методу является то, что вероятность битовой ошибки в канале связи (BER – *Bit Error Rate*) должна быть достаточно низкой: 10^{-15} – 10^{-12} , что выполняется, например, для случая передачи информации с использованием НПК по волоконно-оптическим линиям связи [24]. При составлении матрицы, состоящей из $f \geq n$ кодовых слов, не должно быть кодовых слов с ошибками, так как иначе будет вычислен базис расширенного подпространства \hat{C} , образованного объединением векторов кодовых слов искомого ЛБК и векторов ошибок. Метод предполагает наличие априорной информации относительно длины кодового слова n , в противном случае требуется организация дополнительной процедуры перебора значений указанных параметров кода [25].

Результаты и их обсуждение

Алгоритм определения параметров кода состоит из следующих шагов:

Построение матрицы размерностью $f \times n$ ($f \geq n$) вида

$$M_{f,n} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1k} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2k} & \cdots & p_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{k1} & p_{k2} & \cdots & p_{ij} & \cdots & p_{kn} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{f1} & p_{f2} & \cdots & p_{fk} & \cdots & p_{fn} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где p_{ij} – символы кодового слова, принимающие значение «0» или «1»; i – номер строки матрицы; j – номер столбца матрицы.

Диагонализация матрицы $M_{f,n}$:

$$M_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & p_{1(k+1)} & \cdots & p_{1n} \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & p_{2(k+1)} & \cdots & p_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & p_{k(k+1)} & \cdots & p_{kn} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Получение порождающей матрицы линейного блочного кода (ЛБК):

$$G_{k,n} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & p_{1(k+1)} & \cdots & p_{1n} \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & p_{2(k+1)} & \cdots & p_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & p_{k(k+1)} & \cdots & p_{kn} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Для проверки правильности полученной порождающей матрицы $G_{k,n}$ необходимо использовать полученную на ее основе проверочную матрицу

$H_{(n-k),n}$. Для этого реализуется синдромный метод: если в результате перемножения d кодовых слов получены нулевые синдромы, то $C(n,k)$ найден верно.

При декодировании неизвестного низкоплотного кода в условиях низких значений ОСШ данный метод не применим, так как кодовые слова с ошибками не принадлежат подпространству C , тем самым получение порождающей матрицы затруднено [17; 26].

Повышение скорости обработки при реализации данного алгоритма возможно путем параллельного выполнения задач обработки за счет использования разнородных блоков обработки (*CPU, GPU, FPGA*). Одними из основных принципов построения современных и перспективных вычислительных систем являются возможности реализации [23]:

- параллельного выполнения задач обработки за счет использования разнородных блоков цифровой обработки сигналов (ЦОС);
- балансировки нагрузки;
- вертикальной масштабируемости (наращивание вычислительной мощности за счет внедрения дополнительных блоков обработки);
- горизонтальной масштабируемости (наращивание вычислительной

мощности за счет объединения ресурсов нескольких комплексов);

– программного обеспечения в модульном виде (каждая программа представляет собой модуль, выполняющий частную задачу обработки; коммутация и тиражирование модулей позволяют гибко настраивать процесс обработки входных данных).

Таким образом, для исключения информационных пропусков при реализации режима отложенной обработки необходимо рассмотреть возможности параллельного выполнения наиболее затратных этапов алгоритма с использованием имеющейся аппаратной базы [20].

Значительные вычислительные ресурсы для реализации алгоритма занимает процесс диагонализации матрицы с целью получения ортогонального базиса для рассматриваемого кода. Классический способ [21; 27] получения базиса линейно-векторного пространства с помощью элементарных операций над строками – метод Гаусса – имеет сложность $O(n^3)$. «Метод четырех русских» (*M4RI – Method of the Four Russians Inversion*), который был предложен в [28], уменьшает количество операций сложения строк в $(\log n)$ раз за счет процедуры, основанной на перемножении матриц (методе Конрада) [16; 29].

Пусть матрица A имеет размерность $m \times n$, а ее подматрица B размерностью

$k \times n$ имеет полный ранг. В результате преобразований, определяемых методом Гаусса, первые k строк матрицы A представят собой диагональную матрицу в каноническом виде. Всего существует 2^k комбинаций первых k строк, которые поместим в таблицу T . В таблице T индекс строки соответствует номерам строк подматрицы $k \times n$, участвующих в получении данной (например, если индекс таблицы $T – 5_{dec}$, т. е. 101_{bin} , то для получения данной строки необходимо было сложить первую и третью строки преобразованной подматрицы B). Тогда для «зануления» первых k столбцов матрицы A необходимо воспользоваться таблицей T – рассмотреть первые k бит строки и в соответствии с полученным значением использовать нужную строку таблицы T . Таким образом, вместо k сложений (в худшем случае) данная операция требует всего одно сложение за счет предварительно составленной таблицы [22]. Алгоритм, реализующий данный метод, представлен ниже (рис. 2).

Индекс строки в таблице T представляет собой число, имеющее разрядность k . Для того чтобы «занулить» k бит строки матрицы A , начиная с позиции $(i \bmod k)$, где $0 \leq i < m$, необходимо сложить по модулю 2 данную строку со строкой, взятой из таблицы T , полученной на итерации $(i \bmod k)$, по индексу, определяемому значением k бит (рис. 3).

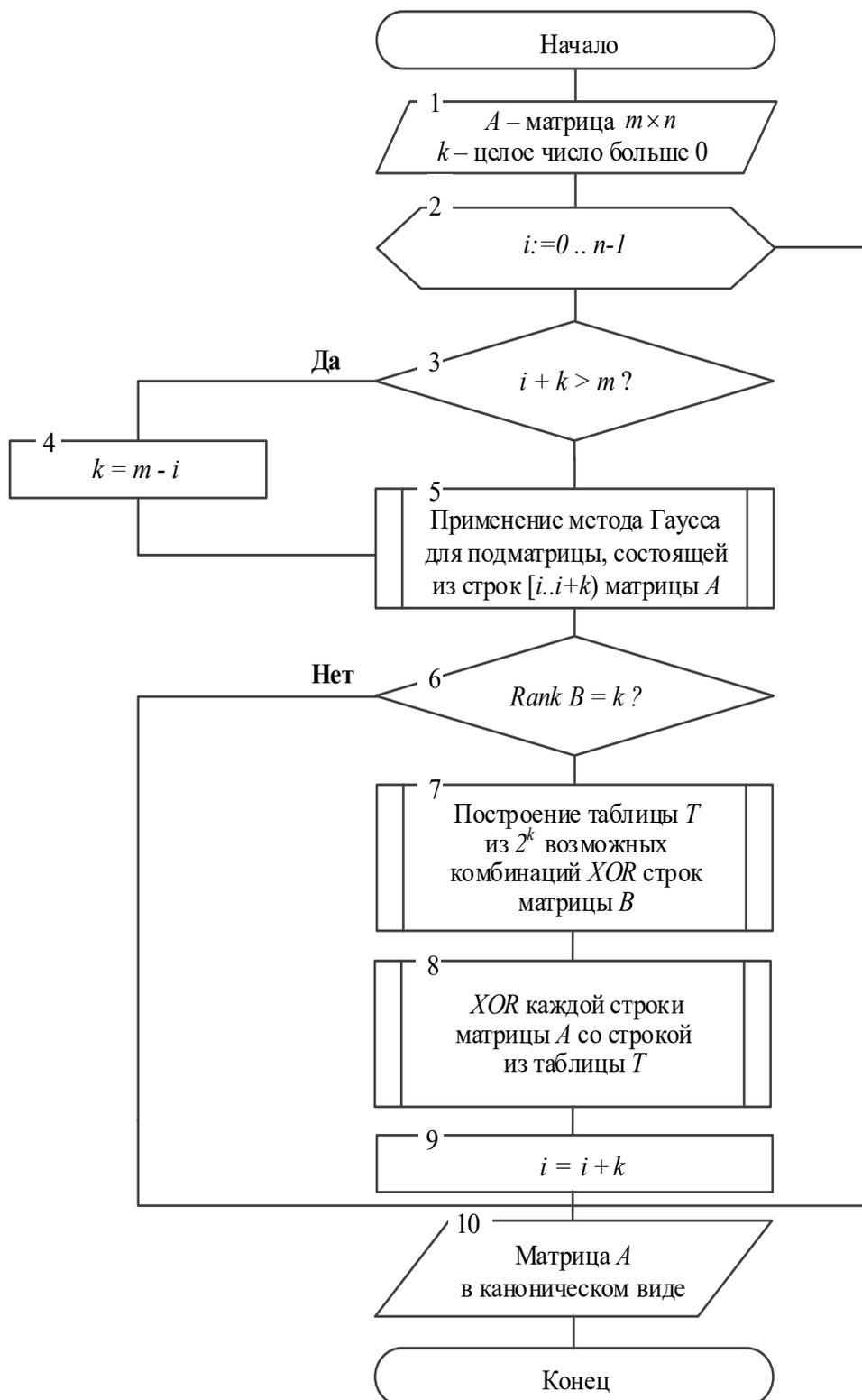


Рис. 2. Алгоритм диагонализации матрицы с применением метода «четырёх русских»

Fig. 2. Matrix diagonalization algorithm based on the Method of Four Russians

Вычисление T строк эффективно выполняются с использованием кода

Грея. Тогда для ее составления понадобится $(2^k - 1)$ сложений строк, так как

индексы соседних строк, определяющие, какие строки подматрицы B (подматрица B – результат применения метода Гаусса в «окне» размерностью k строк матрицы A) необходимо сложить

$$A = \begin{bmatrix} 100 & 10111 & \dots \\ 010 & 11110 & \dots \\ 001 & 00111 & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ 000 & 11010 & \dots \\ 110 & 01011 & \dots \\ 010 & 01001 & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ 110 & 11101 & \dots \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} 000 & 00000 & \dots \\ 001 & 00111 & \dots \\ 010 & 11110 & \dots \\ 011 & 11001 & \dots \\ 100 & 10111 & \dots \\ 101 & 10000 & \dots \\ 110 & 01001 & \dots \\ 111 & 01110 & \dots \end{bmatrix}.$$

Рис. 3. Преобразование исходной матрицы с использованием предварительно составленной таблицы

Fig. 3. Transformation initial matrix using look-up table

Процесс сложения строк матрицы A со строками таблицы T можно производить параллельно. Следовательно, предварительные вычисления позволят избежать строгую последовательность действий согласно методу Гаусса, требующую для вычисления текущей строки знать все предыдущие строки в необходимой преобразованной форме [27].

В ходе проведенного исследования установлено, что увеличение значения параметра k приводит к росту размерности таблицы T , обеспечивая повышение эффективности ее использования, – за одну операцию сложения происходит обработка большего количества столбцов [17]. Однако пропорционально

между собой по модулю два, отличаются только в одном бите. Прямой подход потребует $\left(\frac{k}{2} \cdot 2^k - 1\right)$ сложений.

увеличивается сложность её построения. В качестве компромисса целесообразно применять метод Гаусса над подматрицей B , состоящей из $(N \times k)$ строк, где N – некоторое целое число (рис. 4), что позволит использовать N таблиц T_1, T_2, \dots, T_{N-1} , построенных за $(N \times 2^k)$ сложений строк (вместо $2^{N \times k}$ сложений строк при подсчете значений одной таблицы T и кратном N увеличении параметра k), но их применение потребует на $(N - 1)$ сложений строк больше, чем применение единственной таблицы соответствующей размерности. Построение таблиц также выполняется параллельно в N потоков [28].

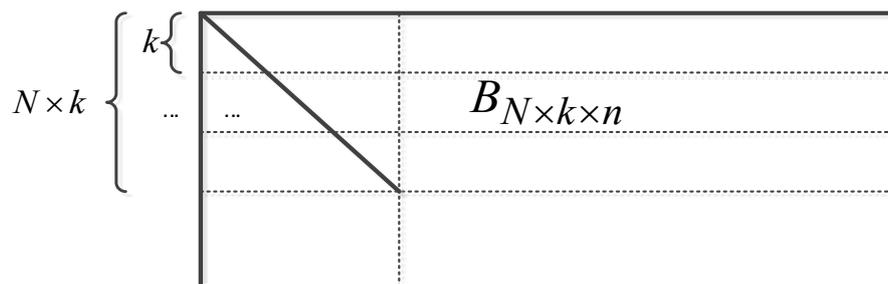


Рис. 4. Разбиение матрицы на подматрицы, позволяющее повысить эффективность параллельной обработки

Fig. 4. Matrix partition for efficient parallel implementation

Выводы

Из рассмотренных методов определения параметров кода наиболее предпочтительным на практике является алгебраический метод, поскольку обладает достаточно невысокой (по сравнению с методом полного перебора) вычислительной сложностью. Однако недостатком алгебраического метода выступает требование к низким значениям вероятности ошибки в канале.

В таком случае необходимо использовать толерантные к ошибкам методы перебора при формировании проверочных уравнений НПК. Найденные уравнения даже в условиях отсутствия полной информации о параметрах кода возможно использовать при помехоустойчивом декодировании для снижения вероятности ошибки в принимаемом сигнале.

Список литературы

1. Performance Analysis of LDPC Decoding Techniques / Abdel Halim A. Zikry, Ashraf Y. Hassan, Wageeda I. Shaban, Sahar F. Abdel-Momen // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). 2021. Vol. 9, is. 5. P. 17–26.
2. Коломенский К. Ю., Демидова А. Ю., Казаринов А. С. От DVB-S к DVB-S2X: прогресс в стандартизации систем цифрового спутникового вещания // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2024 Т. 27, № 2. С. 68–78. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2024-27-2-68-78>
3. Shuang S., Biju I. Analysis of WiFi and WiMAX and Wireless Network Coexistence // International Journal of Computer Networks and Communications (IJCNC). 2014. Vol. 6, N 6. P. 63–78. <https://doi.org/10.5121/ijcnc.2014.6605>
4. Stepanets I., Odoevskii S. Model of microwave link channel with adaptive modulation under the fading conditions // E3S Web of Conferences. 2022. N 351(23). P. 01064. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235101064>

5. CCSDS protocols over DVBS2 – Summary of DVB-S2 summary of definition, implementation, and performance. Washington: Geen Book, 2023. 56 p.
6. Zhou F., Niu L., Tian B. Performance analysis of LDPC decoding algorithm // Journal of Physics. Conference Series. 2020. N 1453(1). P. 012026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1453/1/012026>
7. Lulu A., Hudrouss A. A. LDPC Construction using Randomly Permuted Copies of Parity Check Matrix // An-Najah University Journal for Research. 2018. N 32(1). P. 1544. <https://doi.org/10.35552/aujr.a.32.1.1544>
8. Guan Wu., Liping L. Check-Belief Propagation Decoding of LDPC Codes // IEEE Transactions on Communications. 2023. Vol. 71, is. 12. P. 6849–6858. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3308155>
9. Boundaries of signal-to-noise ratio for adaptive code modulations / K. Pinyoanuntapong, M. Goswami, A. B. Habib, H. M. Kwon, K. Pham // IEEE Military Communications Conference. Baltimore, MD, USA, 2016. P. 132–137.
10. Karimian Y., Ziapour S., Ahmadian-Attari M. Parity Check Matrix Recognition from Noisy Codewords. URL: <https://arxiv.org/abs/1205.4641> (дата обращения: 11.09.2024).
11. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: DVB-S2. Sophia Antipolis Cedex, 2014. 80 p.
12. Low-complexity LDPC decoding algorithms for ultra-high-order modulated signals / H. Zhu, M. Fu, C. Hou, G. Hu // Optics Express. 2023. Vol. 31, is. 25. P. 41645–41657. <https://doi.org/10.1364/OE.507292>
13. Le Gal B., Jeco C., Pignoly V. High-performance hard-input LDPC decoding on multi-core devices for optical space links // Journal of Systems Architecture. 2023. N 137(9). P. 102832. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2023.102832>
14. Zolotarev V. V. Coding Theory as a Simple Optimal Decoding near Shannon's Bound. Optimization Theory of error-correcting coding is a new & quantum mechanics of information theory. M.: Hot Line Telecom, 2018. 334 p.
15. Belief-Propagation Decoding of LDPC Codes with Variable Node-Centric Dynamic Schedules / H. Pin, J. Wang, I. Weng, T. Lee Tofar, C.-Y. Chang // IEEE Transactions on Communications. 2021. Vol. 69, is. 8. P. 5014–5027. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3078776>
16. Dietzfelbinger M., Walzer S. Constant-time retrieval with $O(\log m)$ extra bits // 36th International Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science (STACS 2019). Dagstuhl, Germany: Dagstuhl Publishing, 2019. P. 24:1–24:16. <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.STACS.2019.24>

17. An FPGA-Based LDPC Decoder with Ultra-Long Codes for Continuous-Variable Quantum Key Distribution / S. Yang, J-Q. Liu, Z-Q. Lu, Z-L. Bai, X. Wang, Y. Li // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 47687–47697. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3065776>
18. Fast Blind Recovery of Linear Block Codes over Noisy Channels / P. Wang, Y. Liang, G. Lipo, W. Peng Cheng. URL: <https://arxiv.org/abs/2305.04190> (дата обращения: 16.09.2024).
19. Multi-Gbps LDPC Decoder on GPU Devices / J. Dai, H. Yin, N. Xu, P. Yang // Electronics. 2022. N 11(21). P. 3447. <https://doi.org/10.3390/electronics11213447>
20. Maier B. Cockburn. Optimization of Low-Density Parity Check decoder performance for OpenCL designs synthesized to FPGAs // Journal of Parallel and Distributed Computing. 2017. N 107. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2017.04.001>
21. Gaussian Elimination Method-A Study of Applications / M. Saeed, S. Nisar, S. Razaq, R. Masood // Global Journal of Science Frontier Research: Mathematics and Decision Sciences. 2021. Vol. 13, is. 4. <https://doi.org/10.1109/LES.2021.3052714>
22. Albrecht M. R., Pernet C. Efficient Decomposition of Dense Matrices over GF(2). URL: <https://arxiv.org/abs/1006.1744/> (дата обращения: 17.09.2010).
23. Sudrastawa P. A., Parwata A. Conceptual and Practical Review of Gaussian Elimination and Gauss-Jordan Reduction // Jurnal Ilmu Komputer Indonesia. 2022. Vol. 7, N 2. P. 19–25.
24. Awatif M., Elsidieg A. Implementation of Gaussian-Elimination // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). 2016. Vol. 5, is. 11. P. 7–20.
25. Karimi-Lenji A., Houshmand M., Zarmehi F. A high-performance belief propagation decoding algorithm for codes with short cycle // International Journal of Communication Systems. 2017. N 30(13). <https://doi.org/10.1002/dac.3275>
26. Sharma F., Rajesh Pillai N. Blind recognition of parameters of linear block codes from intercepted bit stream // 2016 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA). Greater Noida, India: IEEE, 2016. <https://doi.org/10.1109/CCAA.2016.7813910>
27. Carrier K., Tillich J.-P. Identifying an unknown code by partial Gaussian elimination // Designs, Codes and Cryptography. 2019. Vol. 87(1). P. 685–713. <https://doi.org/10.1007/s10623-018-00593-7>
28. Donovan D. M., Rao A., Uskuplu E., Yazici E. QC-LDPC Codes from Difference Matrices and Difference Covering Arrays // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 52141–52157. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3279327>
29. Yu Hanqi Peng P.-D., Gong K.-X., Chen Z.-L. LDPC code reconstruction based on algorithm of finding low weight code-words // IEEE Access. 2017. Vol. 38, is. 6. P. 108–117. <https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2017116>

References

1. Abdel Halim A. Zikry, Ashraf Y. Hassan, Wageeda I. Shaban, Sahar F. Abdel-Momen Performance Analysis of LDPC Decoding Techniques. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2021;9:17–26.
2. Kolomensky K.Y., Demidova A.Y., Kazarinov A.S. From DVB-S to DVB-S2X: Progress in Standardization of Digital Satellite Broadcasting Systems. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2024;27(2):68–78. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2024-27-2-68-78>
3. Shuang S., Biju I. Analysis of WiFi and WiMAX and Wireless Network Coexistence. *International Journal of Computer Networks and Communications (IJCNC)*. 2014;6(6):63–78. <https://doi.org/10.5121/ijcnc.2014.6605>
4. Stepanets I., Odoevskii S. Model of microwave link channel with adaptive modulation under the fading conditions. *E3S Web of Conferences*. 2022;351:01064. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235101064>
5. CCSDS protocols over DVBS2 – Summary of DVB-S2 summary of definition, implementation, and performance. Washington: Geen Book; 2023. 56 p.
6. Zhou F., Niu L., Tian B. Performance analysis of LDPC decoding algorithm. *Journal of Physics. Conference Series*. 2020;(1453):012026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1453/1/012026>
7. Lulu A., Hudrouss A. A. LDPC Construction using Randomly Permutated Copies of Parity Check Matrix. *An-Najah University Journal for Research*. 2018;(32):1544. <https://doi.org/10.35552/aujr.a.32.1.1544>
8. Guan Wu., Liping L. Check-Belief Propagation Decoding of LDPC Codes. *IEEE Transactions on Communications*. 2023;71:6849–6858. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3308155>
9. Pinyoanuntapong K., Goswami M., Habib A. B., Kwon H. M., Pham K. Boundaries of signal-to-noise ratio for adaptive code modulations. In: *IEEE Military Communications Conference*. Baltimore, MD, USA; 2016. P. 132–137.
10. Karimian Y., Ziapour S., Ahmadian-Attari M. Parity Check Matrix Recognition from Noisy Codewords. Available at: <https://arxiv.org/abs/1205.4641> (accessed 11.09.2024).
11. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: DVB-S2. Sophia Antipolis Cedex, 2014. 80 p.
12. Zhu H., Fu M., Hou C., Hu G. Low-complexity LDPC decoding algorithms for ultra-high-order modulated signals. *Optics Express*. 2023;31:41645–41657. <https://doi.org/10.1364/OE.507292>

13. Le Gal B., Jego C., Pignoly V. High-performance hard-input LDPC decoding on multi-core devices for optical space links. *Journal of Systems Architecture*. 2023;137:102832. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2023.102832>
14. Zolotarev V.V. Coding Theory as a Simple Optimal Decoding near Shannon's Bound. Optimization Theory of error-correcting coding is a new & quantum mechanics of information theory. Moscow: Hot Line Telecom; 2018. 334 p.
15. Pin H., Wang J., Weng I., Lee Tofar T., Chang C.-Y. Belief-Propagation Decoding of LDPC Codes with Variable Node-Centric Dynamic Schedules. *IEEE Transactions on Communications*. 2021;69:5014–5027. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3078776>
16. Dietzfelbinger M., Walzer S. Constant-time retrieval with $O(\log m)$ extra bits. In: *36th International Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science (STACS 2019)*. Dagstuhl, Germany: Dagstuhl Publishing; 2019. P. 24:1–24:16. <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.STACS.2019.24>
17. An FPGA-Based LDPC Decoder with Ultra-Long Codes for Continuous-Variable Quantum Key Distribution / S. Yang, J-Q. Liu, Z-Q. Lu, Z-L. Bai, X. Wang, Y. Li. *IEEE Access*. 2021;9:47687–47697. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3065776>
18. Wang P., Liang Y., Lipo G., Peng Cheng W. Fast Blind Recovery of Linear Block Codes over Noisy Channels. Available at: <https://arxiv.org/abs/2305.04190> (accessed 16.09.2024).
19. Dai J., Yin H., Xu N., Yang P. Multi-Gbps LDPC Decoder on GPU Devices. *Electronics*. 2022;11(21):3447. <https://doi.org/10.3390/electronics11213447>
20. Maier B. Cockburn. Optimization of Low-Density Parity Check decoder performance for OpenCL designs synthesized to FPGAs. *Journal of Parallel and Distributed Computing*. 2017;(107):1. <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2017.04.001>
21. Saeed M., Nisar S., Razzaq S., Masood R. Gaussian Elimination Method-A Study of Applications. *Global Journal of Science Frontier Research: Mathematics and Decision Sciences*. 2021;13. <https://doi.org/10.1109/LES.2021.3052714>
22. Albrecht M.R., Pernet C. Efficient Decomposition of Dense Matrices over $GF(2)$. URL: <https://arxiv.org/abs/1006.1744/> (accessed 17.09.2010).
23. Sudrastawa P.A., Parwata A. Conceptual and Practical Review of Gaussian Elimination and Gauss-Jordan Reduction. *Jurnal Ilmu Komputer Indonesia*. 2022;7(2):19–25.
24. Awatif M., Elsiddieg A. Implementation of Gaussian-Elimination. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 2016;5(11):7–20.
25. Karimi-Lenji A., Houshmand M., Zarmehi F. A high-performance belief propagation decoding algorithm for codes with short cycle. *International Journal of Communication Systems*. 2017;30. <https://doi.org/10.1002/dac.3275>
26. Sharma F., Rajesh Pillai N. Blind recognition of parameters of linear block codes from intercepted bit stream. In: *2016 International Conference on Computing, Communication and*

Automation (ICCCA). Greater Noida, India: IEEE; 2016. <https://doi.org/10.1109/CCAA.2016.7813910>

27. Carrier K., Tillich J.-P. Identifying an unknown code by partial Gaussian elimination. *Designs, Codes and Cryptography*. 2019;87:685–713. <https://doi.org/10.1007/s10623-018-00593-7>

28. Donovan D.M., Rao A., Uskuplu E., Yazici E. QC-LDPC Codes from Difference Matrices and Difference Covering Arrays. *IEEE Access*. 2023;11:52141–52157. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3279327>

29. Yu Hanqi Peng P.-D., Gong K.-X., Chen Z.-L. LDPC code reconstruction based on algorithm of finding low weight code-words. *IEEE Access*. 2017;38:108–117. <https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2017116>

Информация об авторах / Information about the Authors

Алексей Аркадьевич Двилянский, кандидат технических наук, доцент, МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: dvilyanskiy@mirea.ru, ORCID: 0000-0002-0648-3651

Dvilyanskiy A. Alexei, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation, e-mail: dvilyanskiy@mirea.ru, ORCID: 0000-0002-0648-3651

Александр Владимирович Юрлов, кандидат технических наук, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, г. Орёл, Российская Федерация, e-mail: yurlov@bk.ru

Alexander V. Yurlov, Candidate of Sciences (Engineering), Employee, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation, Orel, Russian Federation, e-mail: yurlov@bk.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-28-46>



УДК 004.93

Метод контроля доступа и мониторинга соблюдения техники безопасности на энергетических хозяйствах предприятий на основе конвейерной нейросетевой модели

А. В. Киселев¹ ✉, Н. С. Брусенцев¹, Е. А. Кулешова¹, Д. А. Ермаков¹

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

✉ e-mail: kisevalexey1990@gmail.com

Резюме

Цель исследования – повышение качества мониторинга нарушений техники безопасности на энергетических хозяйствах предприятий за счет применения метода автоматизированного обнаружения инцидентов в режиме реального времени, основанного на конвейерном применении нейросетевых моделей.

Методы. В статье предложена конвейерная нейросетевая модель YOLO – Tesseract – YOLO, предназначенная для решения задачи автоматизированного контроля доступа и мониторинга соблюдения техники безопасности в режиме реального времени на энергетических хозяйствах предприятий. Предложен метод контроля доступа и мониторинга соблюдения техники безопасности на энергетических хозяйствах предприятий, заключающийся в конвейерном применении нейросетевых моделей YOLOv8 и Tesseract-OCR с использованием морфологической обработки изображений, позволяющий классифицировать группу допуска по электробезопасности на основе распознанных шаблонов в удостоверении сотрудника и детектировать нарушения техники безопасности при работе с электроустановками в режиме реального времени.

Результаты. Проведен ряд экспериментов, в ходе которых были получены матрицы ошибок, что позволило провести оценку качества классификации конвейерной нейросетевой модели с помощью таких метрик, как Recall, Precision и F1-мера, значения метрик были представлены для всех классов. Значение метрики F1-мера для нейросетевой модели YOLO1, используемой для оценки общей эффективности, равно 0,98, свидетельствует о сбалансированном соотношении между точностью и полнотой модели. Значение метрики F1-мера для нейросетевой модели YOLO2, равно 0,73, говорит о приемлемых результатах работы модели для решения задачи классификации в режиме реального времени, но указывает на необходимость доработки данной части конвейерной нейросетевой модели для повышения общей эффективности.

Заключение. Полученные в ходе исследования результаты указывают на приемлемое качество работы конвейерной нейросетевой модели при решении задачи автоматизированного контроля доступа и мониторинга соблюдения техники безопасности в режиме реального времени.

Ключевые слова: мониторинг; техника безопасности; контроль доступа; энергетические хозяйства предприятий; конвейерная нейросетевая модель; Tesseract-OCR; YOLOv8; классификация.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» в рамках проекта № 1.7.21/2-24-4.

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

© Киселев А. В., Брусенцев Н. С., Кулешова Е. А., Ермаков Д. А., 2024

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024;14(4):28–46

Для цитирования: Метод и алгоритм интеллектуальной обработки текстовой информации / А. В. Киселев, Н. С. Брусенцев, Е. А. Кулешова, Д. А. Ермаков // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2024. Т. 14, № 4. С. 28–46. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-28-46>

Поступила в редакцию 16.10.2024

Подписана в печать 15.11.2024

Опубликована 27.12.2024

A method for access control and monitoring compliance with safety regulations in energy facilities of enterprises based on a conveyor neural network model

Alexey V. Kiselev¹✉, Nikita S. Brusencev¹,
Elena A. Kuleshova¹, Dmitriy A. Ermakov¹

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

✉ e-mail: kiselevalexey1990@gmail.com

Abstract

The purpose of research is improving the quality of monitoring safety violations in energy facilities of enterprises through the use of a method of automated incident detection in real time, based on the conveyor application of neural network models.

Methods. The article proposes a pipeline neural network model YOLO – Tesseract – YOLO, designed to solve the problem of automated access control and monitoring compliance with safety regulations in real time at energy facilities of enterprises. A method for access control and monitoring compliance with safety regulations at energy facilities of enterprises is proposed, consisting in the pipeline application of neural network models YOLOv8 and Tesseract-OCR using morphological image processing, allowing to classify a group of electrical safety clearances based on recognized patterns in an employee's ID card and detect safety violations when working with electrical installations in real time.

Results. A number of experiments were conducted, during which error matrices were obtained, which made it possible to evaluate the classification quality of the pipeline neural network model using such metrics as Recall, Precision and F1-measure, the metric values were presented for all classes. The value of the F1-measure metric for the YOLO1 neural network model used to evaluate the overall efficiency, equal to 0.98, indicates a balanced relationship between the accuracy and recall of the model. The value of the F1-measure metric for the YOLO2 neural network model equal to 0.73 indicates acceptable results of the model for solving the classification problem in real time, but indicates the need to refine this part of the pipeline neural network model to improve the overall efficiency.

Conclusion. The results obtained during the study indicate an acceptable quality of the pipeline neural network model in solving the problem of automated access control and monitoring compliance with safety regulations in real time. **Keywords:** monitoring, safety engineering, access control, energy facilities of enterprises, pipeline neural network model, Tesseract-OCR, YOLOv8, classification.

Keywords: monitoring; safety engineering; access control; energy facilities of enterprises; pipeline neural network model; Tesseract-OCR; YOLOv8; classification.

Funding: The research was carried out with the financial support of the strategic academic leadership program "Priority 2030" within the framework of project No. 1.7.21/2-24-4.

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

For citation: Kiselev A.V., Brusencev N.S., Kuleshova E.A., Ermakov D.A. A method for access control and monitoring compliance with safety regulations in energy facilities of enterprises based on a conveyor neural network model. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;14(4):28–46

Введение

При анализе различных видов деятельности сотрудников энергетических хозяйств было выявлено, что опасные и вредные производственные факторы, такие как электрический ток, напряжение и электромагнитное излучение, имеют место при выполнении большинства работ. Это обусловлено тем, что объекты электроснабжения представляют собой участки с повышенной опасностью [1].

В основном 45% фиксированных несчастных случаев происходят в помещениях энергетических хозяйств предприятий. Из них около 33% всех несчастных случаев – это травмы в особо опасных помещениях на территории предприятия, к ним можно отнести подстанции, помещения для зарядки и обслуживания аккумуляторов, литейные и гальванические цеха, а также помещения, в которых есть открытые распределительные устройства и наблюдается наличие двух и более факторов, создающих повышенную опасность [2].

Среди работников, которые имеют право производить работы в электроустановках с напряжением свыше 1000В, т. е. специалистов в данной сфере, включающей электромонтеров, электромехаников, электромонтажников и др., наблюдается наибольшая доля несчастных случаев [3]. Из проведенного в работе [1] анализа несчастных случаев в энергетических хозяйствах предприятий видно, что одной из главных причин подобных инцидентов

является неудовлетворительная работа и слабый контроль в области охраны труда и техники безопасности, а также низкая трудовая дисциплина.

Эффективный контроль доступа и мониторинг соблюдения техники безопасности позволяет снизить вероятность возникновения происшествий и угроз для здоровья работников и окружающей среды [4]. Интеграция автоматизированных решений, таких как видеонаблюдение и системы контроля доступа, позволяет не только повысить уровень безопасности, но и улучшить оперативность реагирования на инциденты, а использование интеллектуальных систем позволяет автоматизировать эти процессы [5].

В работе [6] авторы предлагают систему для обнаружения защитных касок, работающую в режиме реального времени, на базе нейросетевой модели (НМ) YOLO. В ходе экспериментальных исследований было выявлено, что НМ YOLOv7 демонстрирует высокую точность в различных условиях при решении данной задачи. Автор [7] в свою очередь провел сравнительный анализ эффективности применения НМ YOLOv3 и Faster R-CNN для задачи мониторинга техники безопасности и условий труда в режиме реального времени. НМ YOLOv3 продемонстрировала лучшие результаты в точности и скорости детекции по сравнению с Faster R-CNN, особенно для небольших объектов.

Исходя из этих исследований можно сделать вывод, что НМ YOLO показывает приемлемые результаты в решении задач классификации и детекции объектов в реальном времени и применима для мониторинга соблюдения техники безопасности на энергетических хозяйствах предприятий. Однако в условиях растущих угроз как внутреннего, так и внешнего характера обеспечение безопасности объектов энергетики требует внедрения современных систем контроля доступа, включающих идентификацию личности и контроль группы допуска по электробезопасности (ЭБ), которая указывается в специализированном документе – удостоверении по ЭБ [8]. НМ YOLO не является оптимальным инструментом для распознавания символов, особенно в контексте их распознавания в тексте или документах. НМ YOLO разделяет изображение на сетку ячеек, после чего применяются сверточные операции для обнаружения объектов в каждой ячейке [9], что позволяет ускорить процесс обнаружения объектов на изображениях в режиме реального времени, но также может привести к потере деталей и сведению символов к низкому разрешению. Такое низкое разрешение может затруднить правильное распознавание мелких символов. Также для успешного распознавания символов в тексте важна информация о контексте и последовательности символов. Однако YOLO не сохраняет пространственную или последовательную информацию о символах, что может привести к

ошибкам при распознавании. Традиционно модели распознавания символов обучаются на специфических базах данных, содержащих множество примеров символов различных размеров, шрифтов и стилей [10]. НМ YOLO, напротив, обучается на общих базах данных, которые могут не содержать достаточного многообразия символов и не учитывать их особенности.

НМ Tesseract, напротив, позволяет эффективно распознавать обычные символы и активно применяется в области оптического распознавания символов. В работе [11] предлагается модель улучшенного интеллектуального распознавания форм, представляющих собой таблицы с текстом, на основе YOLOv3 и Tesseract-OCR, в которой YOLOv3 обучается определять положение текста в таблице и впоследствии сегментировать текстовые блоки, а Tesseract используется для индивидуального определения текстовых блоков и распознавания символов в таблицах. В работе [12] авторами была предложена методология использования НМ YOLO и Tesseract-OCR для автоматического распознавания номерных знаков в реальном времени, в ходе экспериментов было выявлено, что совместное применение данных НМ позволило достичь точности 92% при обнаружении номерных знаков и 81% при распознавании символов.

Методология совместного применения НМ YOLO и Tesseract показала хорошие результаты, но группа допуска в удостоверении по ЭБ указывается в виде

рукописных римских цифр. Однако Tesseract лучше всего работает с печатным текстом, и его производительность на рукописных текстах, в т. ч. римских цифрах, может быть ограниченной. Tesseract также может иметь сложности с распознаванием рукописных римских цифр, так как они могут сильно варьироваться в форме.

Исходя из проведенного анализа можно сделать вывод, что контроль доступа и мониторинг соблюдения техники безопасности на энергетических хозяйствах является актуальной задачей. Автоматизированный мониторинг соблюдения техники безопасности позволяет снизить вероятность происшествий и угроз для здоровья работников и окружающей среды, а обеспечение безопасности объектов энергетической инфраструктуры требует внедрения современных систем контроля доступа.

Материалы и методы

Для решения задачи детектирования использования необходимой экипировки и мониторинга соблюдения техники безопасности, а также определения группы допуска при предъявлении сотрудником удостоверения по ЭБ предлагается использовать конвейерную модель YOLO – Tesseract – YOLO. Сначала НМ YOLO (YOLO1) используется для обнаружения и классификации объектов на видео с камеры наблюдения в режиме реального времени. На первом этапе YOLO1 обучается для обнаружения экипировки, необходимой для работы с

электроустановками, детекции факта использования телефона во время работы, так как это является прямым нарушением техники безопасности, а также выделения областей, содержащих печатные символы, в удостоверении по ЭБ. На втором этапе используется НМ Tesseract для распознавания текста внутри обнаруженных областей в удостоверении по ЭБ и выделения шаблонных фраз, служащих индикаторами для НМ YOLO2. Далее, НМ YOLO (YOLO2) выделяет области, содержащие информацию о группе допуска, представленную в виде рукописных римских цифр. Это позволяет сосредоточиться только на нужном фрагменте изображения (кадра видео). Обозначения YOLO1 и YOLO2 являются условными, обе НМ реализованы на основе YOLOv8.

В случае попадания на видео экипировки, необходимой для работы с электроустановками – перчатки, каска, жилет (классы Gloves, Helmet, Vest) или телефона (класс Phone), обученная НМ YOLO1 детектирует и классифицирует их. В случае попадания на видео удостоверения по ЭБ (класс Text) применяется метод их распознавания для определения группы допуска сотрудника.

Метод контроля доступа и мониторинга соблюдения техники безопасности на энергетических хозяйствах предприятий:

1. Обученная НМ YOLO1 делит изображение на сегменты, а затем предсказывает границы рамок и вероятности принадлежности к классу для каждого

обнаруженного объекта. В данном случае мы детектируем и классифицируем экипировку, необходимую для работы с электроустановками, факт использования телефона во время работы, а также удостоверение по ЭБ и формируем ограничивающие рамки вокруг них.

2. При обнаружении класса Text в любой из ограничительных рамок к данной области изображения (кадра видео) применяются методы обработки изображений: преобразование в оттенки серого, метод бинаризации, операция морфологического закрытия и медианная фильтрация.

3. К предварительно обработанной на предыдущем этапе области изображения (кадра видео) применяются НМ Tesseract с целью распознавания текста и выделения шаблонных фраз, служащих индикаторами для НМ YOLO2.

4. Определение группы допуска по ЭБ с помощью НМ YOLO2, которая на основе шаблонов, полученных от НМ Tesseract, выделяет фрагменты изображения (кадра видео), содержащие информацию о группе допуска, представленную в виде рукописных римских цифр, и классифицирует обнаруженные объекты внутри выделенных фрагментов.

Блок-схема алгоритма работы метода контроля доступа и мониторинга соблюдения техники безопасности на энергетических хозяйствах предприятий для каждого кадра видео представлена ниже (рис. 1).



Рис. 1. Блок-схема алгоритма работы метода контроля доступа и мониторинга соблюдения техники безопасности на энергетических хозяйствах предприятий для каждого кадра видео

Fig. 1. Block diagram of the algorithm of operation of the access control method and monitoring of compliance with safety regulations in energy facilities of enterprises for each frame of video

Для обучения НМ YOLO1 и YOLO2 были синтезированы уникальные обучающие наборы данных, поскольку существующие наборы данных не удовлетворяют специфическим требованиям исследования.

Обучающий набор данных для НМ YOLO1 был синтезирован из видео, демонстрирующих разнообразные сценарии работы электромонтера с электроустановкой, преобразованных в отдельные кадры с помощью специально разработанного скрипта на языке программирования Python. После разделения видео на кадры была проведена аугментация изображений.

Обучающий набор данных для НМ YOLO2 был синтезирован из изображений, содержащих фотографии удостоверений по ЭБ, также прошедших процедуру аугментации.

Аугментация включала в себя различные методы преобразования, такие как вращение, масштабирование, отражение, изменение яркости и контрастности. Эти методы были применены с целью увеличения объема данных и повышения устойчивости модели к различным вариациям входных изображений, что способствует улучшению обобщающей способности модели. Все изображения были вручную размечены. В результате всех этапов обработки было получено 1937 изображений для обучающего набора данных для НМ YOLO1 и 394 изображения для обучающего набора данных для НМ YOLO2.

Каждый из обучающих наборов данных был разделен на две выборки – обучающую и валидационную. Обучающая выборка использовалась непосредственно для обучения модели и составляла основную часть данных, тогда как валидационная выборка использовалась для оценки производительности модели и настройки гиперпараметров. Разделение данных было выполнено с учетом равномерного распределения различных сценариев и классов, представленных в наборе данных, чтобы обеспечить объективную оценку модели и предотвратить переобучение.

Также была проведена оптимизация параметров НМ в процессе обучения для минимизации функции потерь классификации [13]. В бинарной классификации используется двоичная функция потерь, которая определяется по

$$f(\hat{y}, y) = \begin{cases} 1, & \hat{y} \neq y, \\ 0, & \hat{y} = y, \end{cases} \quad (1)$$

где \hat{y} – рассматриваемый элемент; y – эталонный элемент класса.

Таким образом, потери определяются появлением двух взаимоисключающих состояний выхода НМ.

Принцип работы НМ YOLO1 и YOLO2 можно описать следующим образом: изображение разделяется на сегменты, для каждого сегмента предсказываются два показателя – ограничительные рамки (bounding boxes) и вероятности нахождения в них нужного объекта (confidence) [14]. Далее проводится «оценка доверия» (вероятность

попадания искомого объекта внутрь предсказанной рамки) по

$$\sigma(t_o) = \Pr(object) \cdot IoU(b, object), \quad (2)$$

где IoU – расстояние между кадром-кандидатом и кадром реального объекта.

Для определения достоверности местоположения ограничительной рамки используется отношение площадей ограничительных рамок IoU по

$$IoU = \frac{S(A \cap B)}{S(A \cup B)}, \quad (3)$$

где A и B – предсказанная ограничительная рамка и настоящая ограничительная рамка соответственно. $IoU = 0$, если A и B не пересекаются, $IoU = 1$ в случае идеального наложения [15].

При обнаружении класса Text в любой из ограничительных рамок к данной области изображения (кадра видео) последовательно применяются методы обработки изображений.

Сначала выполняется преобразование цветного изображения img в оттенки серого. Затем происходит операция бинаризации – преобразования оттенков серого изображения в двоичное (черно-белое) изображение [16], где каждый пиксель будет иметь либо значение 0 (черный), либо значение 255 (белый), в зависимости от порогового значения T , по

$$im_b w(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{если } img(x, y) < T, \\ 255, & \text{если } img(x, y) \geq T, \end{cases} \quad (4)$$

где T – пороговое значение, выбранное 210; x, y – координаты центра пикселя; img – исходное изображение.

После бинаризации изображение подвергается морфологическому закрытию. Морфологическое закрытие – это комбинация дилатации и эрозии, применяемая последовательно. Оно используется для того, чтобы закрыть маленькие отверстия и соединить близлежащие объекты. Дилатация – это операция, которая увеличивает область белых пикселей на изображении. При применении этой операции к изображению каждый пиксель обходится структурирующим элементом (ядром). Структурирующий элемент – это небольшая матрица (ядро), которая используется в морфологической обработке изображений для определения способа изменения этих изображений. При попадании пикселя в центр области, определяемой ядром, он заменяется значением максимума в этой области. Эрозия – это обратная операция дилатации, она уменьшает объекты на изображении. При применении эрозии каждый пиксель заменяется минимумом в области, определяемой ядром. Пиксель остается белым только в том случае, если все пиксели в области под ядром также белые [17].

Сначала изображение подвергается дилатации (5), а затем – эрозии (6) с использованием одного и того же значения ядра. Морфологическое закрытие можно описать следующим образом:

$$D(I) = \max_{\delta \in kernel} I(x + \delta_x, y + \delta_y), \quad (5)$$

$$E(I) = \min_{\delta \in kernel} I(x + \delta_x, y + \delta_y), \quad (6)$$

$$C(I) = E(D(I)) = E\left(\max_{\delta \in \text{kernel}} I(x + \delta_x, y + \delta_y)\right), \quad (7)$$

где I – это исходное изображение; (x, y) – координаты центра пикселя; δ – это смещение по элементам ядра; kernel – ядро.

Затем для уменьшения шумов к обработанному изображению применяется медианный фильтр. Медианный фильтр – это нелинейный фильтр, который заменяет каждый пиксель изображения значением медианы в заданном окружении вокруг него [18]. Для каждого пикселя в изображении выбирается область (или «окно»), обычно квадратной формы. Из значений пикселей в этом окне вычисляется медиана, и это значение используется для замены центрального пикселя. Выражение для медианного фильтра можно описать по

$$M(I) = \text{median} \times \left\{ I(x + i, y + j) \mid -\frac{k}{2} \leq i, j \leq \frac{k}{2} \right\}, \quad (8)$$

где $M(I)$ – результирующее изображение после применения медианного фильтра к изображению I ; $I(x, y)$ – значение пикселя в исходном изображении в позиции (x, y) ; k – размер окна; i и j – индексы смещения относительно центрального пикселя.

После предобработки изображение разбивается на строки текста, а затем строки – на отдельные символы. Tesseract анализирует структуру изображения, чтобы определить расположение текста и зоны, содержащие символы. На этапе распознавания Tesseract использует нейронные сети и различные алгоритмы машинного обучения для распознавания отдельных символов [19]. Система имеет предварительно

обученные модели, которые позволяют ей идентифицировать разнообразные шрифты и стили текста. После распознавания текста происходит этап постобработки, на котором Tesseract может использовать словари и алгоритмы для исправления возможных ошибок, связанных с опечатками или неправильным распознаванием символов. Это помогает повысить точность финального результата.

Далее с помощью НМ YOLO2 осуществляется выбор области интереса (фрагмента изображения, содержащего информацию о группе допуска, представленную в виде рукописных римских цифр). Для этого используются заранее определенные критерии (шаблонные фразы), позволяющие сузить область анализа исключительно до тех участков, где располагаются данные о группах допуска, что позволяет НМ YOLO2 фокусироваться на классификации символов внутри этих областей.

Результаты и их обсуждение

Для оценки эффективности НМ YOLO – Tesseract – YOLO при решении поставленной задачи был проведен ряд экспериментов в режиме реального времени с использованием веб-камеры в специализированной лаборатории центра компетенций в области энергетики на базе ФГБОУ ВО «ЮЗГУ», оснащенной электроустановками. В ходе экспериментов были реализованы различные сценарии работы электромонтера с электроустановкой.

На основе данных, полученных в результате проведенных экспериментов, была построена нормализованная матрица ошибок (рис. 2), отображающая результаты классификации НМ YOLO1.

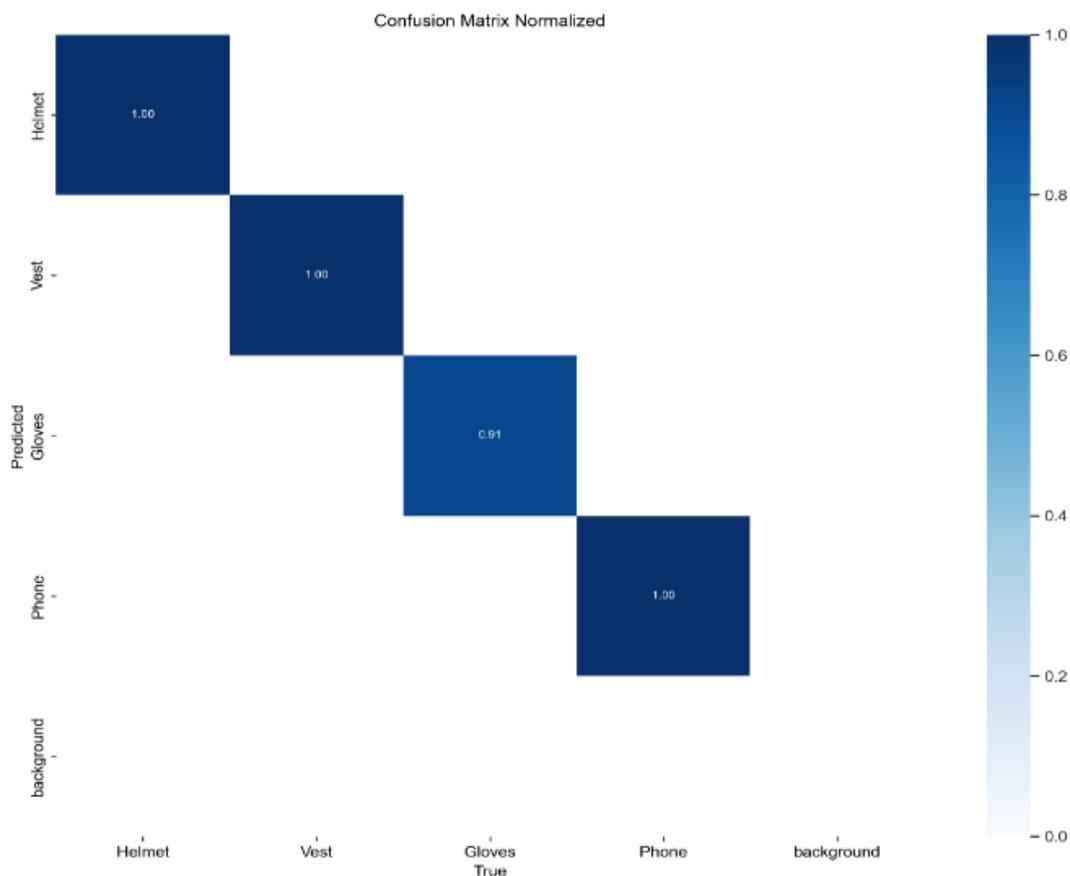


Рис. 2. Нормализованная матрица ошибок

Fig. 2. Normalized Error matrix

На основе полученных данных о количестве ошибок первого и второго рода была проведена оценка качества классификации с помощью метрик Recall, Precision и $F1$ -меры (рис. 3–5).

Метрика оценки качества классификации Recall описывается по

$$recall = \frac{TP}{TP+FN}, \quad (9)$$

где TP (True Positives) – количество правильно предсказанных положительных примеров; TN (True Negatives) – количество правильно предсказанных отрицательных примеров; FP (False Positives) –

количество неправильно предсказанных положительных примеров; FN (False Negatives) – количество неправильно предсказанных отрицательных примеров [20].

Метрика оценки качества классификации Precision описывается по

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP}. \quad (10)$$

Метрика оценки качества классификации $F1$ -мера описывается по

$$F1 = 2 \cdot \frac{Precision \cdot recall}{Precision+recall}. \quad (11)$$

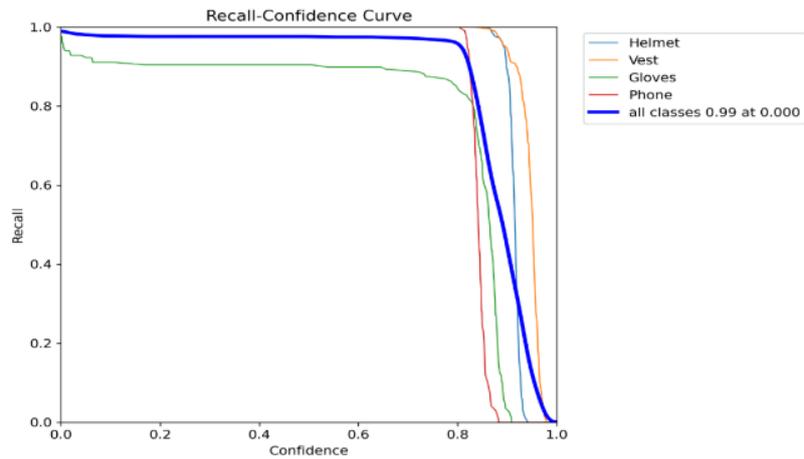


Рис. 3. График кривых для метрики Recall

Fig. 3. Graph of curves for Recall metrics

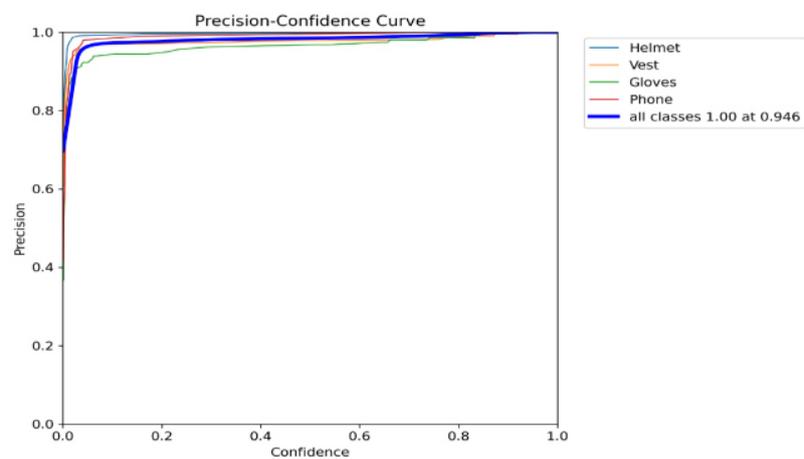


Рис. 4. График кривых для метрики Precision

Fig. 4. Curve graph for the Precision metric

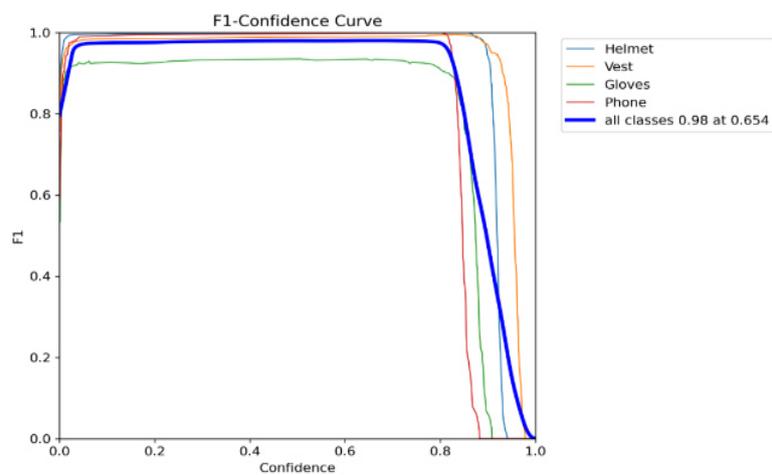


Рис. 5. График кривых для метрики F1-мера

Fig. 5. Graph of curves for the F1-metric

Значение метрики Recall для всех классов all classes, равное 0,99 (рис. 3), означает, что модель машинного обучения правильно классифицировала 99% истинных положительных TP примеров из общего числа истинных положительных примеров.

Также из графика кривых (рис. 4) видно, что значение метрики Precision для всех классов равно 1.00. Это говорит о том, что для каждого класса модель совершила нулевое количество

ложноположительных ошибок FP , т. е. каждый объект был классифицирован правильно.

Метрика $F1$ -мера для всех классов имеет значение 0,98 (рис. 5), что указывает на высокую точность и полноту в классификации положительных примеров.

Рассмотрим примеры детекции и классификации объектов НМ YOLO1 по классам: перчатки, каска, жилет, телефон (классы Gloves, Helmet, Vest, Phone) (рис. 6).

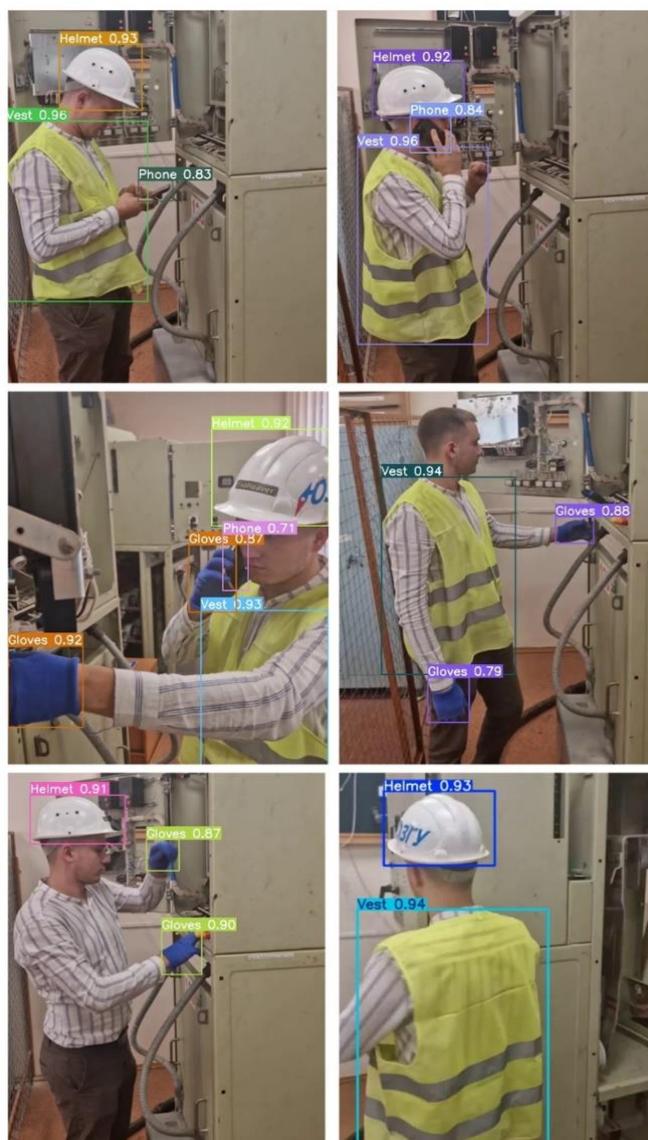


Рис. 6. Примеры классификации объектов

Fig. 6. Examples of classification of objects

В случае попадания на видео удостоверения по ЭБ (класс Text) применяется метод их распознавания для определения группы допуска сотрудника (I – V). На рисунке 7 представлена нормализованная

матрица ошибок. На основе полученных данных о количестве ошибок первого и второго рода была проведена оценка качества классификации с помощью метрики $F1$ -мера (рис. 8).

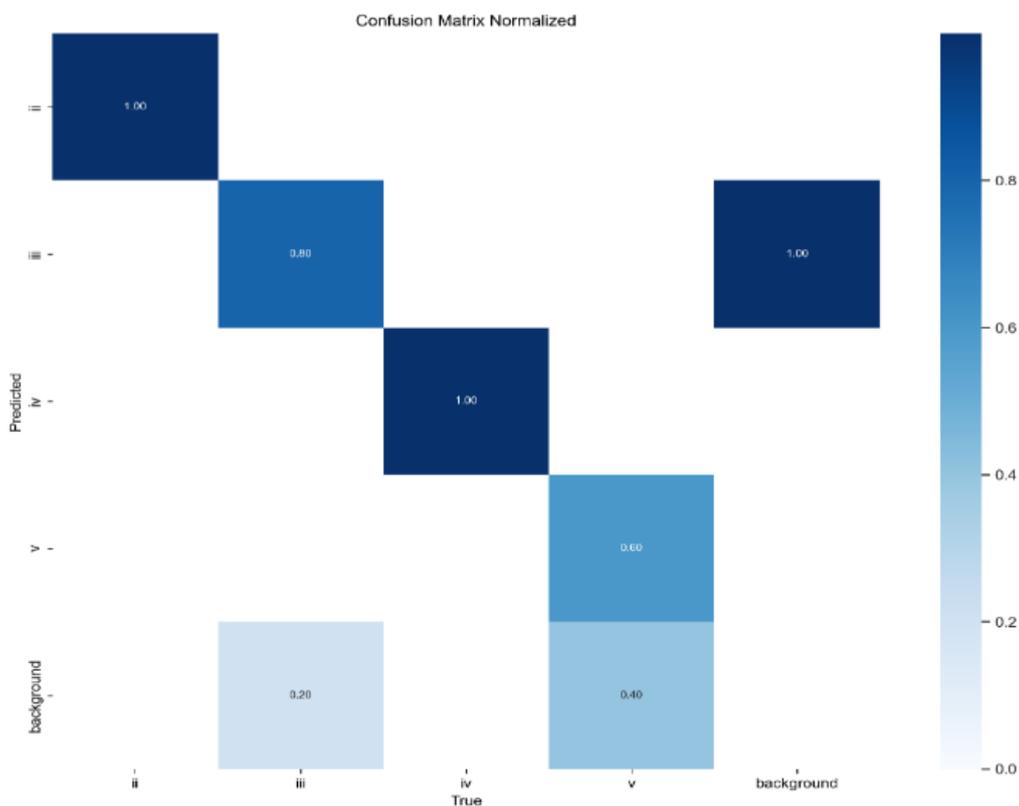


Рис. 7. Нормализованная матрица ошибок для классификации группы допуска

Fig. 7. Normalized error matrix for tolerance group classification

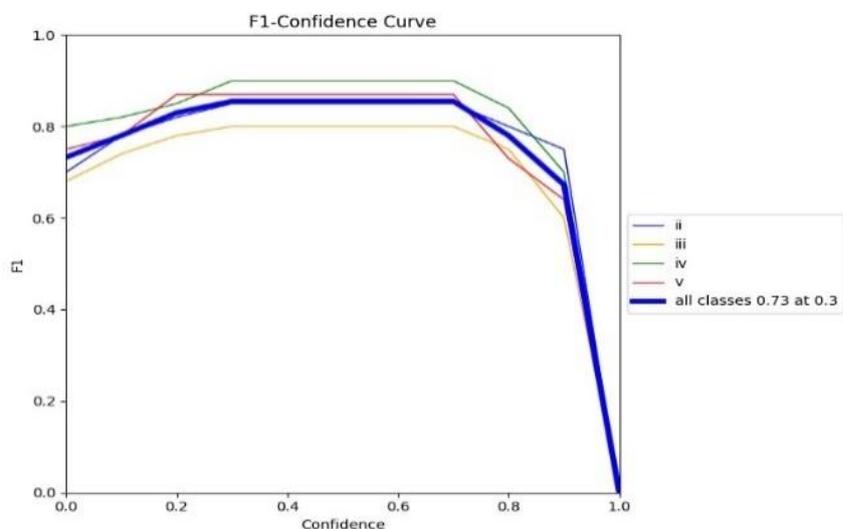


Рис. 8. График кривых для метрики $F1$ -мера при классификации группы допуска

Fig. 8. Curve plot for the $F1$ -measure in tolerance group classification

Метрика $F1$ -мера для всех классов имеет значение 0,73 (рис. 8), что указывает на приемлемую точность и полноту в классификации положительных примеров.

Рассмотрим примеры классификации рукописных римских цифр, отображающих группы допуска по ЭБ (рис. 9).

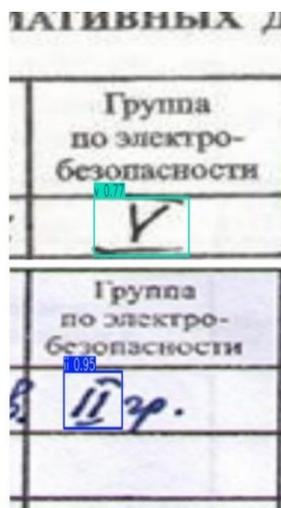


Рис. 9. Примеры классификации рукописных римских цифр (группы допуска)

Fig. 9. Examples of classification of handwritten Roman numerals (tolerance groups)

Выводы

В статье представлены результаты применения конвейерной модели YOLO – Tesseract – YOLO для решения задачи автоматизированного контроля доступа и мониторинга соблюдения техники безопасности в режиме реального времени на энергетических хозяйствах предприятий.

Предложен метод контроля доступа и мониторинга соблюдения техники безопасности на энергетических хозяйствах предприятий, заключающийся в конвейерном применении НМ YOLOv8 и Tesseract-OCR с использованием морфологической обработки изображений, позволяющий классифицировать группу допуска по ЭБ на основе распознанных

шаблонов в удостоверении по ЭБ сотрудника и детектировать нарушения техники безопасности при работе с электроустановками в режиме реального времени.

Для обучения НМ YOLO были синтезированы уникальные обучающие наборы данных, состоящие из кадров видео, демонстрирующих разнообразные сценарии работы электромонтера с электроустановкой и изображений удостоверений по ЭБ, прошедших процедуру аугментации.

Проведен ряд экспериментов, в ходе которых были получены матрицы ошибок, что позволило провести оценку качества классификации НМ с помощью таких метрик, как Recall, Precision и $F1$ -мера, значения метрик были представлены для

всех классов. Полученные для НМ YOLO1 значения свидетельствуют о том, что НМ точно классифицировала все классы объектов без ложноположительных ошибок (метрика Precision). Значение метрики Recall, равное 0,99, показывает, что модель правильно обнаружила 99% реальных объектов среди всех классов, что говорит об эффективности НМ при обнаружении положительных примеров. Значение метрики $F1$ -мера, используемой для оценки общей эффективности, равное 0,98, свидетельствует о сбалансированном соотношении между

точностью и полнотой модели. Значение метрики $F1$ -мера для НМ YOLO2, равное 0,73, говорит о приемлемых результатах работы модели для решения задачи классификации в режиме реального времени, но указывает на необходимость доработки данной части конвейерной НМ для повышения общей эффективности.

Данные результаты указывают на приемлемое качество работы НМ при решении задачи автоматизированного контроля доступа и мониторинга соблюдения техники безопасности в режиме реального времени.

Список литературы

1. Костюков А. В. Электробезопасность в энергетических хозяйствах предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 8. С. 222–231. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-8-222-231>
2. Статистика несчастных случаев на производстве // Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosinfostat.ru/travmatizm> (дата обращения: 09.09.2024).
3. Дарина Н. А., Васильев А. В. Анализ производственного электротравматизма и методы его снижения // Академический Вестник ЕЛПИТ. 2020. Т. 5, № 4 (14). С. 5–12.
4. Омаров Е. Н. Управление рисками в области охраны труда, промышленной безопасности в нефтегазовом секторе: проблемы, меры предосторожности и последствия // Yessenov science journal. 2024. № 1. С. 96–109.
5. Брежнев А. В., Томакова Р. А., Брежнева А. Н. Информационная система мониторинга на основе интеллектуальной классификации изображений видеопотоков // Информационное общество. 2023. № 5. С. 134–142. https://doi.org/10.52605/16059921_2023_05_134
6. Ryza S., Nazma N., Harikrishnan R. Safety Helmet Detection // International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology. 2024. P. 299–305. <https://doi.org/10.48175/IJARST-19423>
7. Левщанов С. В. Применения нейронных сетей для мониторинга техники безопасности на строительных площадках // Вестник науки. 2024. Т. 4, № 7(76). С. 247–251.
8. Давыдова Н. А., Востриков М. В., Тихомиров В. А. Роль охраны труда и электробезопасности в технологических процессах Забайкальской дирекции по энергообеспечению // Молодая наука Сибири. 2021. № 2(12). С. 205–213.

9. An Evaluation of Advancements in YOLO Algorithm / N. Jawaid, N. Imtiaz, K. Pathan, I. Brohi // *Journal of Information & Communication Technology*. 2024. Vol. 18(1). P. 44–51.
10. Prakisyana N., Kusmanto, B., Hatta P. Comparative Analysis of Google Vision OCR with Tesseract on Newspaper Text Recognition // *Media of Computer Science*. 2024. Vol. 1. P. 31–46. <https://doi.org/10.69616/mcs.v1i1.178>
11. YOLOv3-Tesseract Model for Improved Intelligent form Recognition / Y.-A. Zhang, Z. Pan, H. Dui, G. Bai // *Recent Advances in Computer Science and Communications*. 2021. Vol. 14, is. 6. P. 1833–1842. <https://doi.org/10.2174/2666255813666191204141610>
12. Automatic License Plate Recognition Using YOLOv4 and Tesseract OCR / R. Rai, S. Shitole, P. Sutar, S. Kaldhone, J. D. Jadhav // *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*. 2022. Vol. 10(3). P. 1656. <https://doi.org/10.15680/IJIRCCE.2022.1003089>
13. Киселев А. В., Брусенцев Н. С., Кулешова Е. А. Анализ эффективности применения двухэтапных нейросетевых моделей для раннего обнаружения лесных пожаров // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2024. Т. 14, № 1. С. 8–23. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-8-23>
14. Diwan T., Anirudh G., Tembhurne J. V. Object detection using YOLO: challenges, architectural successors, datasets and applications // *Multimedia Tools and Applications*. 2023. Vol. 82. P. 9243–9275. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-13644-y>
15. Traffic sign detection in unconstrained environment using improved YOLOv4 / S. Saxena, S. Dey, M. Shah, S. Gupta // *Expert Systems with Applications*. 2023. Vol. 238(2). P. 121836. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121836>
16. Лошкарёв А. С., Тимофеев И. А. Исследование процесса бинаризации изображений с использованием локальных значений порога // *Прикладная информатика*. 2021. Т. 16, № 6(96). С. 54–65. <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2021-16-6-54-65>
17. Киселев А. В., Филист С. А., Шаталова О. В. Методы обработки, анализа и классификации медико-биологических сигналов и данных. Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2023. 328 с.
18. Реализация медианной фильтрации цифровых изображений на основе применения искусственных нейронных сетей / А. В. Велигоша, Н. Н. Малышко, М. В. Морозов, Р. И. Струков // *Теория и техника радиосвязи*. 2022. № 2. С. 21–26.
19. Joshi K. Study of Tesseract OCR. GLS KALP // *Journal of Multidisciplinary Studies*. 2024. Vol. 1. P. 41–50. <https://doi.org/10.69974/glskalp.01.02.54>

20. Chung H.-Y., Choi J., Heo T.-S., Seo S. Significance of Recall in Automatic Metrics for HT Evaluation // *The Journal of Translation Studies*. 2022. Vol. 23. P. 81–100. <https://doi.org/10.15749/jts.2022.23.1.003>

References

1. Kostyukov A.V. Electrical safety in energy facilities of enterprises. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki = Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*. 2021;8:222–231. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-8-222-231>
2. Statistics of industrial accidents. Federal State Statistics Service. (In Russ.) Available at: <https://rosinfostat.ru/travmatizm> (accessed 09.09.2024).
3. Darina N.A., Vasiliev A.V. Analysis of industrial electrical injuries and methods for their reduction. *Akademicheskij Vestnik ELPIT = Academic Bulletin ELPIT*. 2020;4(14):5–12. (In Russ.)
4. Omarov E.N. Risk management in the field of labor protection, industrial safety in the oil and gas sector: problems, precautions and consequences. *Yessenov science journal*. 2024;1:96–109. (In Russ.)
5. Brezhnev A.V., Tomakova R.A., Brezhneva A.N. Information monitoring system based on intelligent classification of video stream images. *Informatsionnoye obshchestvo = Information Society*. 2023;(5):134–142. (In Russ.) https://doi.org/10.52605/16059921_2023_05_134
6. Ryza S., Nazma N., Harikrishnan R. Safety Helmet Detection. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*. 2024:299–305. <https://doi.org/10.48175/IJAR SCT-19423>
7. Levshanov S.V. Application of neural networks for monitoring safety at construction sites. *Vestnik nauki = Science Bulletin*. 2024;4(7):247–251. (In Russ.)
8. Davydova N.A., Vostrikov M.V., Tikhomirov V.A. The role of labor protection and electrical safety in technological processes of the Trans-Baikal Directorate for Energy Supply. *Molodaya nauka Sibiri = Young Science of Siberia*. 2021; 2(12):205–213. (In Russ.)
9. Jawaid N., Imtiaz N., Pathan K., Brohi I. An Evaluation of Advancements in YOLO Algorithm. *Journal of Information & Communication Technology*. 2024;18(1):44–51.
10. Prakisyana N., Kusmanto B., Hatta P. Comparative Analysis of Google Vision OCR with Tesseract on Newspaper Text Recognition. *Media of Computer Science*. 2024;1:31–46. <https://doi.org/10.69616/mcs.v1i1.178>

11. Zhang Y.-A., Pan Z., Dui H., Bai G. YOLOv3-Tesseract Model for Improved Intelligent Form Recognition. *Recent Advances in Computer Science and Communications*. 2021;14:1833–1842. <https://doi.org/10.2174/2666255813666191204141610>
12. Rai R., Shitole S., Sutar P., Kaldhone S., Jadhav J.D. Automatic License Plate Recognition Using YOLOv4 and Tesseract OCR. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*. 2022;10(3):1656. <https://doi.org/10.15680/IJIRCE.2022.1003089>
13. Kiselev A.V., Brusentsev N.S., Kuleshova E.A. Analysis of the efficiency of using two-stage neural network models for early detection of forest fires. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoye priborostroyeniye = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;14(1):8–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-8-23>
14. Diwan T., Anirudh G., Tembhurne J. V. Object detection using YOLO: challenges, architectural successors, datasets and applications. *Multimedia Tools and Applications*. 2023;82:9243–9275. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-13644-y>
15. Saxena S., Dey S., Shah M., Gupta S. Traffic sign detection in unconstrained environment using improved YOLOv4. *Expert Systems with Applications*. 2023;238(2):121836. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121836>
16. Loshkarev A.S., Timofeev I.A. Study of the image binarization process using local threshold values. *Prikladnaya informatika = Applied Informatics*. 2021;16(6):54–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2021-16-6-54-65>
17. Kiselev A.V., Filist S.A., Shatalova O.V. Methods of processing, analysis and classification of medical and biological signals and data. Stary Oskol: Tonkie naukoemkie tekhnologii; 2023. 328 p. (In Russ.)
18. Veligoshka A.V., Malyshko N.N., Morozov M.V., Strukov R.I. Implementation of median filtering of digital images based on the use of artificial neural networks. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi = Theory and Technology of Radio Communication*. 2022;2:21–26. (In Russ.)
19. Joshi K. Study of Tesseract OCR. GLS KALP. *Journal of Multidisciplinary Studies*. 2024;1:41–50. <https://doi.org/10.69974/glskalp.01.02.54>
20. Chung H.-Y., Choi J., Heo T.-S., Seo S. Significance of Recall in Automatic Metrics for HT Evaluation. *The Journal of Translation Studies*. 2022;23:81–100. <https://doi.org/10.15749/jts.2022.23.1.003>

Информация об авторах / Information about the Authors

Киселев Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kiselevalexey1990@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7228-0281

Alexey V. Kiselev, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Computer Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kiselevalexey1990@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7228-0281

Брусенцев Никита Сергеевич, студент кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: brusencev2001@yandex.ru, ORCID: 0009-0008-7805-2819

Nikita S. Brusencev, Student of the Department of Computer Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: brusencev2001@yandex.ru, ORCID: 0009-0008-7805-2819

Кулешова Елена Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: lena.kuleshova.94@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8270-564X

Elena A. Kuleshova, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Information Security, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: lena.kuleshova.94@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8270-564X

Ермаков Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dmitriyermakov98@yandex.ru, ORCID: 0009-0003-9426-7741

Dmitriy A. Ermakov, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dmitriyermakov98@yandex.ru, ORCID: 0009-0003-9426-7741

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-47-59>



УДК 004

Модель информационной системы для поддержки данными умных домашних помощников

А. В. Калач¹✉, Т. Е. Смоленцева², Я. А. Акатьев²

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий
пр-т Революции, д. 19, г. Воронеж 394036, Российская Федерация

² МИРЭА – Российский технологический университет
пр-т Вернадского, д. 78, г. Москва 119454, Российская Федерация

✉ e-mail: a_kalach@mail.ru

Abstract

Цель исследования. Цифровые товары часто представляют собой инновации по сравнению с физическими аналогами. Одной из ключевых технологий, улучшивших голосовое взаимодействие с устройствами, являются умные домашние помощники, которые стали важным элементом цифровизации повседневной жизни. Использование концепции обеспечения данными таких помощников в управлении организацией обеспечивает необходимый объем хранения информации.

Цель исследования – разработка модели информационной системы для поддержки умных помощников в управлении, соответствующей концепции непрямого управления.

Методы. Для решения поставленных задач использовались методы системного анализа, системной инженерии и моделирования.

Результаты. Приведены особенности реализации обеспечения данными умных помощников при управлении организацией на основе положений концепции непрямого управления. Представлено математическое обеспечение алгоритма распознавания запросов пользователей. Описаны особенности реализации системы обеспечения данными для управления организацией, основанные на концепции непрямого управления. Разработана модель информационной системы, позволяющая одному администратору оперативно классифицировать пользовательские запросы в реальном времени и предоставлять справочную и тактическую информацию. При этом все множества пользовательских запросов будут оперативно классифицированы и отмечены в режиме реального масштаба времени.

Заключение. Создана модель информационной системы для поддержки умных домашних помощников. Для администрирования подобной системы достаточно одного администратора для оперативной классификации пользовательских запросов в режиме реального масштаба времени. Представлены практические рекомендации по организации эффективного взаимодействия конечных пользователей с умными домашними помощниками и аналогичными современными интеллектуальными технологиями.

Ключевые слова: информационная система; умный помощник; управление; категоризация запроса; регулярные выражения; математическое обеспечение.

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

© Калач А. В., Смоленцева Т. Е., Акатьев Я. А., 2024

Для цитирования: Калач А. В., Смоленцева Т. Е., Акатьев Я. А. Модель информационной системы для поддержки данными умных домашних помощников // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 4. С. 47–59. [https://doi.org/ 10.21869/2223-1536-2024-14-4-47-59](https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-47-59)

Поступила в редакцию 14.10.2024

Подписана в печать 10.11.2024

Опубликована 27.12.2024

Model of an information system for data support of smart home assistants

Andrey V. Kalach^{1,2} ✉, Tatyana E. Smolentseva², Yaroslav A. Akatyev²

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies
19 Revolution Ave., Voronezh 394036, Russian Federation

² MIREA – Russian Technological University
78 Vernadsky Ave., Moscow 119454, Russian Federation

✉ e-mail: a_kalach@mail.ru

Резюме

Purpose of research. Digital goods are often innovations compared to their physical counterparts. One of the key technologies that have improved voice interaction with devices is smart home assistants, which have become an important element of digitalization of daily life. The use of the concept of providing such assistants with data in the management of an organization ensures the necessary amount of information storage. The purpose of the research is to develop an information system model to support smart assistants in management, corresponding to the concept of indirect management. Methods. Methods of system analysis, system engineering and modeling were used.

Methods. System analysis and modeling methods were used to solve the tasks.

Results. The features of the implementation of providing smart assistants with data when managing an organization based on the provisions of the concept of indirect management are given. The mathematical support of the user query recognition algorithm is presented. The features of the implementation of a data management system for managing an organization based on the concept of indirect management are described. An information system model has been developed that allows one administrator to quickly classify user requests in real time and provide timely and tactical information. In this case, all sets of user requests will be operationally classified and marked in real time.

Conclusion. A model of an information system has been created to support smart home assistants. To administer such a system, one administrator is enough to quickly classify user requests in real time. Practical recommendations on the organization of effective interaction of end users with smart home assistants and similar modern intelligent technologies are presented.

Keywords: information system; smart assistant; management; request categorization; regular expressions; mathematical support.

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

For citation: Kalach A.V., Smolentseva T.E., Akatyev Y.A. Model of an information system for data support of smart home assistants. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2024;14(4):47–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-47-59>

Received 14.10.2024

Accepted 10.11.2024

Published 27.12.2024

Введение

Достижения последних лет в области искусственного интеллекта позволили нам общаться с любыми цифровыми устройствами довольно простым и естественным для нас способом – с помощью голоса. Сегодня в результате тотальной цифровизации общества технологии умного дома получили широкое распространение и даже естественную интеграцию в нашу экосистему. Такая модель взаимодействия человека с компьютером широко распространена: пользователи легче вступают в диалог с умным помощником с помощью голосовых команд, чем при использовании клавиатуры и устройств дистанционного управления [1].

Следует отметить, что эти технологии предполагают наличие взаимосвязанных общей инфокоммуникационной сетью интеллектуальных устройств, способных взаимодействовать друг с другом [2].

Умные домашние помощники (УДП) как неотъемлемые составляющие систем умного дома выступают в качестве центрального блока, позволяя пользователям управлять и контролировать умные бытовые приборы (освещение, отопление, системы безопасности и устройства мультимедиа) [3].

Таким образом, УДП выступают в роли личных помощников пользователей, способствуя переходу от управления действиями и процессами традиционными кнопками к управлению голосовыми командами. В состав УДП входят центральный командный центр с программным обеспечением распознавания голоса и аппаратное устройство, функционирующее под управлением данного

программного обеспечения, например динамик [4].

В результате такой эффективной компоновки УДП пользователи обеспечены возможностью легко, в привычном стиле взаимодействовать со своими умными домами посредством голосового общения с виртуальными помощниками, например, такими как Alexa, Cortana, Алиса или Siri [5].

Различия в психологии владения физическими и цифровыми товарами обуславливают разницу в их стоимости. Проведенный анализ современных публикаций [6] показал, что умные помощники и цифровые ассистенты применяются все чаще в разных сферах человеческой деятельности, что обусловлено низкими затратами на создание и эксплуатацию подобных систем [7].

Необходимо отметить, что умные помощники часто сопровождаются соответствующей информационной системой, которая предусматривает возможность внешнего администрирования. Такая информационная система позволяет гибко управлять цифровым ассистентом, производить актуализацию данных, хранимых в базе или хранилище, а также выполнять при необходимости централизованные рассылки клиентам, подключенным к умному помощнику.

В случае отсутствия поддерживающей информационной системы умные помощники обычно эксплуатируются как программные роботы или чат-боты с фиксированной и неадминистрируемой базой данных. Такой подход оказывается полезным для быстрой развертки системы, однако совершенно не подходит в рамках управления организацией, поскольку все процессы управления требуют наличие соответствующего

инструментария для быстрого принятия управленческих решений и внесения изменений.

Материалы и методы

Таким образом, актуальными представляются проектирование и разработка соответствующей системы обеспечения данными и управления умным помощником для повышения эффективности управления организационной системой.

Цель исследования – формирование модели информационной системы для обеспечения данными умных помощников в управлении организации, соответствующей концепции непрямого управления [8; 9].

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Определение требований к информационному обеспечению системы, в т. ч. с точки зрения распознавания и обработки данных [10].

2. Формирование математического обеспечения данными в соответствии с требованиями концепции [11].

3. Формирование диаграммы потоков данных, описывающей передачу данных между различными модулями информационной системы (ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010 «Процессы жизненного цикла программного обеспечения»).

4. Обоснование целесообразности применения сформированной модели обеспечения данными.

Особенности технологии умного дома

Технологии умного дома быстро завоевали популярность и уже стали неотъемлемой частью нашей повседневной жизни, продемонстрировав самые быстрые темпы роста на рынке потребительских технологий в ХII в. [12].

При этом необходимо отметить, что цифровые ассистенты играют решающую роль в среде умного дома. Большинство исследований умных помощников посвящены в основном сравнительному анализу возможностей и технических параметров цифровых помощников разных производителей устройств [13].

Результаты современных исследований убедительно доказывают, что внедрение технологии умного дома обусловлено в первую очередь легкостью и простотой использования цифровых устройств и очевидной полезностью (воспринимаемое социальное присутствие, доверие и взаимопонимание) для конечного пользователя [14].

Умные помощники, как правило, содержат следующие функциональные модули: модуль рассылок, модуль обработки типовых запросов, модуль обработки нетиповых запросов, принимающий решение об ответе, а также вспомогательные модули в соответствии со спецификой предметной области. Подобный набор элементов свойственен и классической информационной системе управления взаимоотношениями с клиентами, однако в рамках управления организацией модуль обработки нетиповых запросов существенным образом видоизменяется и усложняется [15]. Модуль обработки нетиповых запросов обычно содержит базу данных запросов, выделенных по ключевым словам. Данная база обычно формируется аналитиками на основании типовых задач, возникающих перед умным помощником. Далее умному помощнику для формирования модуля обработки запросов требуется модель распознавания запроса. Запрос пользователя возможно распознавать разными алгоритмами, закладываемыми в систему. В данном случае

особую роль играет два фактора скорость и точность распознавания пользовательского намерения. Скорость распознавания важна при обработке большого количества запросов в секунду от различных пользователей, чтобы иметь возможность не перегружать систему с точки зрения хранения исторических данных [16]. В таком случае необходимо формирование базы данных с достаточной степенью нормализации для сохранения скорости обработки запросов [17].

Точность распознавания запроса определяется тем, насколько точный ответ дает робот на запрос пользователя. Для повышения точности возможно применять различные алгоритмы классификации пользовательского запроса. Рассмотрим возможности некоторых таких алгоритмов.

1. Текстовый классификатор. Наиболее частое решение, позволяющее на основе базы данных по словам анализировать полученный от пользователя текст. В таком случае алгоритм сравнивает словами с доступными кодовыми словами в базе данных и считает вероятность совпадения. Далее алгоритм выбирает вариант ответа с наибольшим процентом совпадения.

У данного алгоритма есть ряд сложностей в эксплуатации: если проверять точное совпадение слов, то остается высокая возможность, что пользователь не задаст вопрос так, как было заложено в алгоритм. При использовании алгоритма машинного обучения для аналитики запроса может возникать ситуация, когда при равных вероятностях ответа система будет выдавать ненужный пользователю ответ, хотя нужный в системе хранится. А также процесс слабо подвержен постоянной актуализации, на каждом этапе

актуализации потребуется переобучение модели [18].

2. Распознавание запроса с помощью регулярного выражения. Такой подход позволит обеспечить гарантированное нахождение необходимого сочетания слов, отбрасывая все остальные варианты. Подобная методика зачастую применяется для выделения ключевого запроса из большого объема текста для категоризации и последующей передачи оператору [19].

Очевидными недостатками являются сложность регулярного создания выражений и малый спектр решаемых задач распознавания.

3. Генерация ответа на запрос пользователя. Подобные умные помощники стали особенно популярны в 2023 г. при популяризации искусственного интеллекта. Алгоритм собирает большой объем информации из открытых источников и на основании него старается сгенерировать ответ на запрос пользователя.

Ключевой недостаток – непредсказуемость ответа. Робот может давать совершенно разные ответы при одинаковом запросе и в таком случае является скорее инструментом генерации текста, нежели решения задачи.

С учетом изложенных фактов целесообразно в рамках системы управления использовать сочетание текстового классификатора и регулярных выражений. Создать выборку типовых выражений, которые не имеют схожих запросов и распознавать их регулярным выражением. Эти команды возможно вынести на вкладку «Помощь» или даже создать кнопки под них в чате с роботом.

Остальные выражения предлагается распознавать с помощью текстового классификатора, в таком случае точность

распознавания запросов остается высокой и регулируется степенью обучения модели нейронной сети. При таком подходе даже если пользователь не получает верного ответа с первой попытки запроса, он может переформулировать запрос и найти нужный ответ.

Таким образом, для модели выбран гибридный подход к распознаванию запросов.

Математическое обеспечение алгоритма распознавания нетиповых запросов умному помощнику

Для реализации рассмотренной системы распознавания необходимо сформировать математическое обеспечение алгоритма распознавания нетиповых запросов для определения вероятности совпадения варианта запроса с хранимыми ответами.

Рассмотрим множество $A = \{a_0, a_1, \dots, a_i, \dots, a_n\}$, в котором n – количество типов вопросов, $i \in \overline{0, n}$, $a_i = \{b_0, b_1, \dots, b_j, \dots, b_m\}$, m – количество вопросов заданного типа, $j \in \overline{0, m}$, b_i – вопрос темы заданной элементом a_i .

Положим $n = m$, тогда множество A представимо в виде матрицы:

$$A = \begin{bmatrix} a_{00} & \cdots & a_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n0} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где a_{ij} – вопрос номер j темы номер i , $i, j \in \overline{0, n}$

Введём множество B , определяющее множество ответов на вопросы:

$$B = \begin{bmatrix} b_{00} & \cdots & b_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n0} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где b_{ij} – ответ номер j темы номер i , $i, j \in \overline{0, n}$

Между множествами A и B определено отображение f :

$$f: A \rightarrow B,$$

такое, что

$$\forall a \in A, \forall b \in B \exists x: f(a)x = f(b), \quad (3)$$

где $X \in X$, X – матрица вероятностей выбора ответа b_{ij} на вопрос a_{ij} .

$$X = \begin{bmatrix} x_{00} & \cdots & x_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n0} & \cdots & x_{nn} \end{bmatrix}, x_i \in [0; 1], \quad (4)$$

где x_{ij} – вероятность выбора ответа b_{ij} на вопрос a_{ij} , важно отметить, что т. к. x_{ij} – вероятность, то на строки матрицы X накладывается условие полной группы событий:

$$\sum_{i=0}^n x_{ji} = 1, j \in \overline{0, n}. \quad (5)$$

Выбор элементов матрицы X будет являться ключевым при составлении процесса выбора. Определим процесс выбора ответа как задачу машинного обучения, ведь действительно: матрица A – множество допустимых вопросов; матрица B – множество допустимых ответов, тогда матрица X – веса нашей модели, получаем обыкновенное СЛАУ:

$$AX = B, \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{00}x_0 + a_{01}x_1 + \dots + a_{0i}x_i + \dots + a_{0n}x_n = b_0 \\ \dots \\ a_{n0}x_0 + a_{n1}x_1 + \dots + a_{ni}x_i + \dots + a_{nn}x_n = b_n \end{array} \right\}. \quad (7)$$

Необходимо определить функцию потерь, которая бы определяла близость найденных вероятностей к истинным. Поскольку задача является многоклассовой

классификации, используем кросс-энтропию (CE):

$$-\sum_{i=1}^N y_{o,c} \log(p_{o,c}), \quad (8)$$

где N – количество классов; $y_{o,c}$ – бинарный индикатор (0 или 1), если ответ «с» – правильный ответ на вопрос «о»; p – предсказываемая вероятность того, что на вопрос «о» следует ответ «с».

Определённую выше функцию потерь обозначим $f(\bar{x})$, где \bar{x} – вектор данных вероятностей.

Необходимо отметить, что данную функцию необходимо минимизировать: $f(\bar{x}) \rightarrow \min$.

Воспользуемся алгоритмом ADAM (Adaptive Movement Estimation). Первым шагом является вычисление градиента данной функции:

$$g(t) = \nabla f(\bar{x}) = \frac{\partial f}{\partial \bar{x}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_0} \\ \frac{\partial f}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial x_i} \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial x_n} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где n – размерность вектора \bar{x} , далее вычисляем первый момент:

$$m(t) = \beta_1 m(t-1) + (1-\beta_1) g(t),$$

$$v(t) = \beta_2 v(t-1) + (1-\beta_2) g(t)^2, \quad (10)$$

где $\beta_{1,2}$ – задаваемые гиперпараметры.

Далее пересчитываем с учётом смещения:

$$mhat(t) = \frac{m(t)}{1-\beta_1(t)} \quad vhat(t) = \frac{v(t)}{1-\beta_2(t)}.$$

Гиперпараметры $\beta_{1,2}$ также обновляются:

$$\beta_1(t) = \beta_1', \quad \beta_2(t) = \beta_2'.$$

Далее совершается шаг алгоритма ADAM, который обновляет вероятности рассматриваемой задачи:

$$x(t) = x(t-1) - \alpha \frac{mhat(t)}{\sqrt{vhat(t) + eps}}, \quad (11)$$

где α – гиперпараметр скорости обучения модели, а eps – некоторая достаточно малая величина во избежание деления на 0.

Результаты и их обсуждение

С учетом представленной математической модели и выбранного гибридного алгоритма распознавания пользовательского запроса робот должен отправлять ответ на запрос. Рассмотрим диаграмму потоков данных, сформированную на примере умного помощника образовательной организации. В качестве примера представлена диаграмма потоков данных, применимая для типового умного помощника с учетом специфики предметной области – образовательной организации (рис. 1).

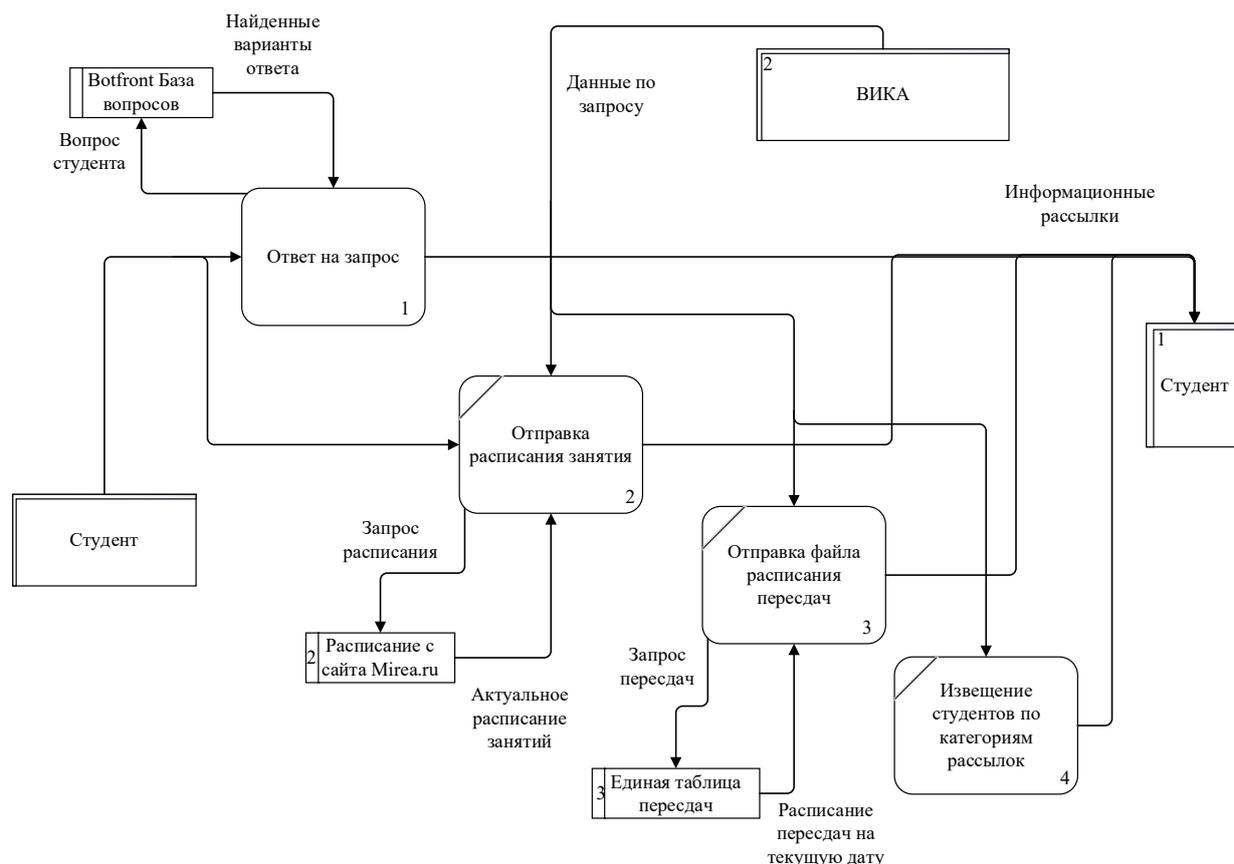


Рис. 1. Диаграмма потоков данных

Fig. 1. Data Flow Diagram

На диаграмме (рис. 1) видно, что входящий запрос сначала обрабатывается в модуле распознавания, а далее принимается решение о выдаче конкретного ответа. В любом случае пользователю отправляется информационная рассылка в ответ, зависящая от запроса. Если запрашивается расписание занятий или расписание передач, то оно распознается регулярным выражением и отправляется заранее сохраненный в базе данных ответ.

На рисунке 2 представлена декомпозиция распознавания ответа на вопрос. В данном случае создана отдельная база данных для хранения нетиповых вопросов, происходит обработка текста и

принятие решения о выдаче нужного поискового запроса. Далее, выбранный текстовый ответ с графическим изображением прикладывается в поток информационной рассылки с выдачей конкретному пользователю или набору пользователей.

Таким образом, сформирована модель обеспечения данными умного помощника. Модель состоит из набора баз данных для типовых модулей информационной системы, алгоритма распознавания запроса пользователя, а также математического обеспечения алгоритма для определения вероятности совпадения запроса с хранимыми в базах ответами.

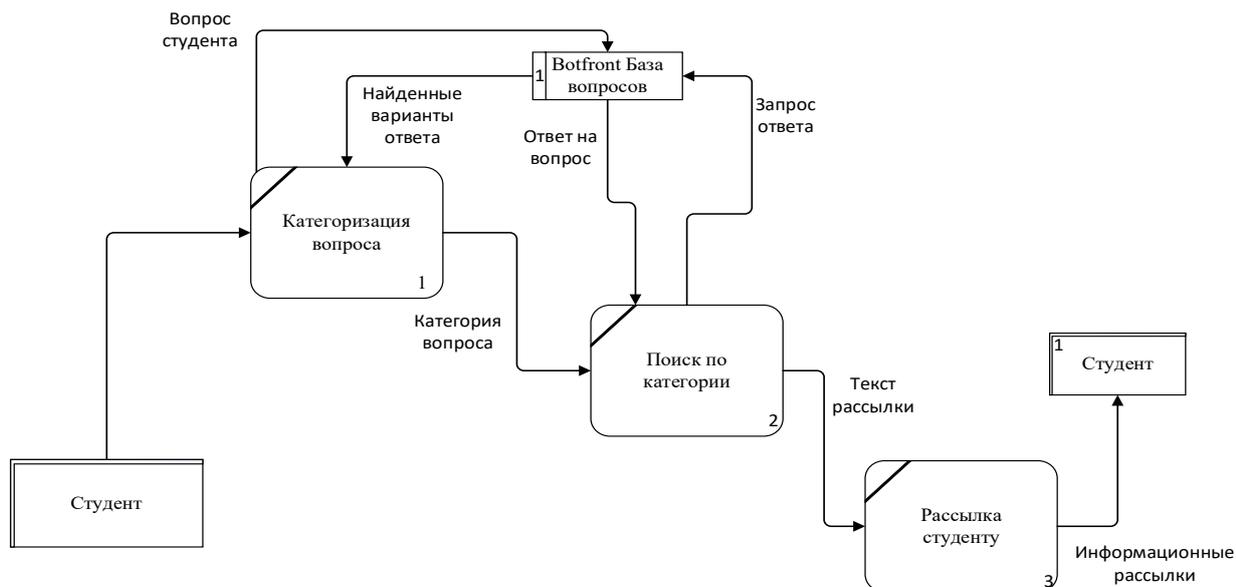


Рис. 2. Декомпозиция процесса ответа на вопрос

Fig. 2. Decomposition of the Question-Answering Process

В рамках модели предлагается отдельное хранимое во невзаимосвязанных базах данных типовых ответов на запросы, определяемые регулярными выражениями, а также отдельной базы с набором хранимых ответов и примеров вызова данного ответа. Подобный подход к организации хранения данных обеспечит скорость работы системы с пользователями.

Математическое обеспечение позволит с необходимой точностью определять необходимый вариант ответа и предоставлять его пользователям. При повторном запросе система не сохранит контекст и определит запрос заново. Таким образом, с достаточной точностью будет достигнут искомый ответ от системы.

Выводы

Умные домашние помощники представляют собой прорывной пример

цифровизации нашей повседневной жизни. Применение данной концепции обеспечения данными умного помощника при управлении организации гарантирует достаточный объем хранения данных, а также большой перечень решаемых задач.

Таким образом, созданная модель демонстрирует новый подход к реализации справочной и оперативной информации в сфере управления организационными системами. Необходимо отметить, что для администрирования подобной системы достаточно одного администратора, а сама система позволяет получать пользователями как справочную информацию, так и рассылать оперативную и тактическую информацию о деятельности организации. При этом все множества пользовательских запросов будут оперативно классифицированы в режиме реального масштаба времени.

Список литературы

1. Analysis of security and data control in smart personal assistants from the user's perspective / C. Valero, J. Pérez, S. Solera-Cotanilla, M. Vega-Barbas, G. Suarez-Tangil, M. Alvarez-Campana, G. López // *Future Generation Computer Systems*. 2023. Vol. 144. P. 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.future.2023.02.009>
2. Canziani B., MacSween S. Consumer acceptance of voice-activated smart home devices for product information seeking and online ordering // *Computers in Human Behavior*. 2021. Vol. 119. P. 106714. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2021.106714>
3. Pal D., Zhang X., Siyal S. Prohibitive factors to the acceptance of internet of things (IoT) technology in society: a smart-home context using a resistive modelling approach // *Technology in Society*. 2021. Vol. 66. P. 101683. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101683>
4. Kim S., Choudhury A. Exploring older adults' perception and use of smart speaker-based voice assistants: A longitudinal study // *Computers in Human Behavior*. 2021. Vol. 124. P. 106914. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2021.106914>
5. Benlian A., Klumpe J., Hinz O. Mitigating the intrusive effects of smart home assistants by using anthropomorphic design features: A multimethod investigation // *Information Systems Journal*. 2019. Vol. 30 (6). P. 1010–1042.
6. Mamonov S., Koufaris M. Fulfillment of higher-order psychological needs through technology: The case of smart thermostats // *International Journal of Information Management*. 2020. Vol. 52. P. 102091. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102091>
7. An intertwined perspective on technology and digitised individuals: Linkages, needs and outcomes / O. Turel, C. Matt, M. Trenz, C. M. K. Cheung // *Information Systems Journal*. 2020. Vol. 30 (6). P. 929–939.
8. Mallat N., Tuunainen V., Wittkowski K. Voice Activated Personal Assistants – Consumer use contexts and usage behavior. URL: <https://aisel.aisnet.org/amcis2017/TREOs/Presentations/32/> (дата обращения: 11.09.2024).
9. Смоленцева Т. Е., Акатьев Я. А. Концепция применения умных помощников в управлении организацией на примере института информационных технологий РТУ МИРЭА // *Надежность и качество: труды международного симпозиума*. Пенза: Пензенский государственный университет. 2023 Т. 1. С. 344–347.
10. Сумин В. И., Смоленцева Т. Е., Акатьев Я. А. Анализ возможностей проектирования реляционной базы данных в процессе приведения к шестой нормальной форме // *Вестник Воронежского института ФСИН России*. 2021. № 1. С. 109–114.
11. Томашевская В. С., Яковлев Д. А. Способы обработки неструктурированных данных // *Российский технологический журнал*. 2021. Т. 9, № 1(39). С. 7–17. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-7-17>

12. Why do people use artificial intelligence (AI)-enabled voice assistants? / S. Malodia, N. Islam, P. Kaur, A. Dhir // *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2021. N 99. <https://doi.org/10.1109/tem.2021.3117884>
13. Marikyan D., Papagiannidis S., Alamanos E. “Smart home sweet smart home”: An examination of smart home acceptance // *International Journal of E-Business Research*. 2021. Vol. 17(2). P. 1–23.
14. Lau J., Zimmerman B., Schaub F. Alexa, are you listening? // *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*. 2018. Vol. 2. P. 1–31.
15. Cross-sectional research: A critical perspective, use cases, and recommendations for IS research / C. Maier, J. B. Thatcher, V. Grover, Y. K. Dwivedi // *International Journal of Information Management*. 2023. P. 102625. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2023.102625>
16. Fernandes T., Oliveira E. Understanding consumers’ acceptance of automated technologies in service encounters: Drivers of digital voice assistants adoption // *Journal of Business Research*. 2021. Vol. 122. P. 180–191.
17. Can AI artifacts influence human cognition? The effects of artificial autonomy in intelligent personal assistants / Q. Hu, Y. Lu, Z. Pan, Y. Gong, Z. Yang // *International Journal of Information Management*. 2021. Vol. 56. P. 102250. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102250>
18. Raff S., Rose S., Huynh T. Perceived creepiness in response to smart home assistants: A multi-method study // *International Journal of Information Management*. 2024. Vol. 74. P. 102720. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2023.102720>
19. Abdi N., Ramokapane K. M., Such J. M. More than smart speakers: Security and privacy perceptions of smart home personal assistants // *Fifteenth Symposium on Usable Privacy and Security*. Santa Clara, CA: USENIX Association, 2019. P. 451–466.

References

1. Valero C., Pérez J., Solera-Cotanilla S., Vega-Barbas M., Suarez-Tangil G., Alvarez-Campana M., López G. Analysis of security and data control in smart personal assistants from the user’s perspective. *Future Generation Computer Systems*. 2023;144:12–23. <https://doi.org/10.1016/j.future.2023.02.009>
2. Canziani B., MacSween S. Consumer acceptance of voice-activated smart home devices for product information seeking and online ordering. *Computers in Human Behavior*. 2021;119:106714. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2021.106714>
3. Pal D., Zhang X., Siyal S. Prohibitive factors to the acceptance of internet of things (IoT) technology in society: a smart-home context using a resistive modelling approach. *Technology in Society*. 2021;66:101683. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101683>

4. Kim S., Choudhury A. Exploring older adults' perception and use of smart speaker-based voice assistants: A longitudinal study. *Computers in Human Behavior*. 2021;124:106914. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2021.106914>
5. Benlian A., Klumpe J., Hinz O. Mitigating the intrusive effects of smart home assistants by using anthropomorphic design features: A multimethod investigation. *Information Systems Journal*. 2019;30(6):1010–1042.
6. Mamonov S., Koufaris M. Fulfillment of higher-order psychological needs through technology: The case of smart thermostats. *International Journal of Information Management*. 2020;52:02091. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102091>
7. Turel O., Matt C., Trenz M., Cheung C.M.K. An intertwined perspective on technology and digitised individuals: Linkages, needs and outcomes. *Information Systems Journal*. 2020;30(6):929–939.
8. Mallat N., Tuunainen V., Wittkowski K. Voice Activated Personal Assistants – Consumer use contexts and usage behavior. Available at: <https://aisel.aisnet.org/amcis2017/TREOs/Presentations/32/> (accessed 11.09.2024).
9. Smolentseva T.E., Akatiev Ya.A. The concept of using smart assistants in managing an organization using the example of the Institute of Information Technology of the Russian Technical University MIREA. In: *Nadezhnost' i kachestvo: trudy mezhdunarodnogo simpoziuma = Reliability and quality: Proceedings of the International Symposium*. Vol. 1. Penza: Penza State University; 2023. P. 344–347. (In Russ.)
10. Sumin V.I., Smolentseva T.E., Akatiev Ya.A. Analysis of the possibilities of designing a relational database in the process of reduction to the sixth normal form. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii = Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*. 2021;(1):109–114. (In Russ.)
11. Tomashevskaya V.S., Yakovlev D.A. Methods for processing unstructured data. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(1):7–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-7-17>
12. Malodia S., Islam N., Kaur P., Dhir A. Why do people use artificial intelligence (AI)-enabled voice assistants? *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2021:99. <https://doi.org/10.1109/tem.2021.3117884>
13. Marikyan D., Papagiannidis S., Alamanos E. “Smart home sweet smart home”: An examination of smart home acceptance. *International Journal of E-Business Research*. 2021;17(2):1–23.
14. Lau J., Zimmerman B., Schaub F. Alexa, are you listening? *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*. 2018;2:1–31.
15. Maier C., Thatcher J.B., Grover V., Dwivedi Y.K. Cross-sectional research: A critical perspective, use cases, and recommendations for IS research. *International Journal of Information Management*. 2023:102625. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2023.102625>

16. Fernandes T., Oliveira E. Understanding consumers' acceptance of automated technologies in service encounters: Drivers of digital voice assistants adoption. *Journal of Business Research*. 2021;122:180–191.

17. Hu Q., Lu Y., Pan Z., Gong Y., Yang Z. Can AI artifacts influence human cognition? The effects of artificial autonomy in intelligent personal assistants. *International Journal of Information Management*. 2021;56:102250. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102250>

18. Raff S., Rose S., Huynh T. Perceived creepiness in response to smart home assistants: A multi-method study. *International Journal of Information Management*. 2024;74:102720. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2023.102720>

19. Abdi N., Ramokapane K.M., Such J.M. More than smart speakers: Security and privacy perceptions of smart home personal assistants. In: Fifteenth Symposium on Usable Privacy and Security. Santa Clara, CA: USENIX Association; 2019. P. 451–466.

Информация об авторах / Information about the Authors

Калач Андрей Владимирович, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий, моделирования и управления, Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: a_kalach@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8926-3151

Andrey V. Kalach, Doctor of Sciences (Chemistry), Professor, Head of the Department of Information Technologies, Modeling and Control, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation, e-mail: a_kalach@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8926-3151

Смоленцева Татьяна Евгеньевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры практической и прикладной информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: smolenceva@mirea.ru, ORCID: 0000-0003-4810-8734

Tatyana E. Smolenceva, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Practical and Applied Informatics, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation, e-mail: smolenceva@mirea.ru, ORCID: 0000-0003-4810-8734

Акатьев Ярослав Алексеевич, ассистент кафедры практической и прикладной информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: akatev@mirea.ru, ORCID: 0009-0003-7047-4551

Yaroslav A. Akatev, Assistant of the Department of Practical and Applied Informatics, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation, e-mail: akatev@mirea.ru, ORCID: 0009-0003-7047-4551

Модели и алгоритмы формирования задающих воздействий системы управления двухзвенной стопы реабилитационного экзоскелета

С. Ф. Яцун¹ ✉, Л. Б. Кисляк¹, Е. В. Савельева¹, Г. А. Фурсов¹

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Целью исследования является разработка математической модели двухзвенной активной стопы реабилитационного экзоскелета нижних конечностей и получение данных для формирования задающих воздействий на приводы устройства.

Методы. В статье рассматривается метод создания задающих воздействий для системы управления приводами двухзвенной стопы реабилитационного экзоскелета. Это устройство предназначено для комплексной механической проработки голеностопного сустава, чтобы восстановить его подвижность и приблизить движения к естественной походке. Для этого в рамках проведенного эксперимента используется метод видеозахвата траектории, который создаёт траектории движения характерных точек стопы с учётом параметров походки и антропометрии пациента. При обработке данных использован ряд Фурье 5-го порядка, позволяющий аппроксимировать полученные экспериментальные траектории с заданной точностью и обеспечить их плавность.

Результаты. В работе установлено, что математическая модель двухзвенной стопы позволяет анализировать и прогнозировать движение стопы робота в различных режимах реабилитации. В модели учитываются управляющие и возмущающие воздействия, а также такие параметры, как масса, момент инерции, длина шага, высота подъёма ноги и другие характеристики.

Результаты математического моделирования позволяют выполнить синтез приводной системы робота – совокупность механизмов, передающих движение от двигателя к звеньям стопы. Это поможет обеспечить надёжную и эффективную работу устройства.

Кроме того, результаты моделирования будут использованы для проектирования основных конструктивных элементов робота, таких как шарниры, крепления, амортизаторы и т. д.

Заключение. Результаты математического моделирования позволяют рассчитать приводную систему робота – совокупность механизмов, передающих движение от двигателя к звеньям стопы. Это поможет обеспечить надёжную и эффективную работу устройства. Кроме того, результаты моделирования будут использованы для проектирования основных конструктивных элементов робота, таких как шарниры, крепления, амортизаторы и т. д. Это позволит создать прочное и долговечное устройство, способное выполнять свои функции в различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: реабилитационный экзоскелет; устройство механотерапии; голеностопный сустав; двухзвенная стопа; система управления; задающие воздействия; ряд Фурье.

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации гранта РФФИ № 24-29-00467 «Модели и алгоритмы разработки приборов активно-пассивной механотерапии».

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

Для цитирования: Модели и алгоритмы формирования задающих воздействий системы управления двухзвенной стопы реабилитационного экзоскелета / С. Ф. Яцун, Л. Б. Кисляк, Е. В. Савельева, Г. А. Фурсов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 14, № 4. С. 60–77. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-60-77>

Поступила в редакцию 14.10.2024

Подписана в печать 12.11.2024

Опубликована 27.12.2024

Models and algorithms for the formation of commanding influences of the control system of the rehabilitation exoskeleton two-link foot

Sergey F. Jatsun¹ ✉, Leonid B. Kislyak¹, Ekaterina V. Saveleva¹, Gavriil A. Fursov¹

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

The purpose of research is to develop a mathematical model of a two-link active foot of a rehabilitation exoskeleton for the lower extremities and to obtain data for generating the setting effects on the device drives.

Methods. The article discusses a method for creating reference actions for the drive control system of a two-link foot of a rehabilitation exoskeleton. This device is designed for complex mechanical processing of the ankle joint in order to restore its mobility and bring movements closer to a natural gait. For this purpose, the video trajectory capture method is used in the framework of the experiment, which creates trajectories of movement of characteristic points of the foot taking into account the gait parameters and anthropometry of the patient. When processing the data, a 5th-order Fourier series is used, which allows approximating the obtained experimental trajectories with a given accuracy and ensuring their smoothness.

Results. The work established that the mathematical model of a two-link foot allows analyzing and predicting the movement of the robot's foot in various rehabilitation modes. The model takes into account control and disturbance effects, as well as parameters such as mass, moment of inertia, step length, leg lift height, and other characteristics. The results of mathematical modeling allow synthesizing the robot's drive system - a set of mechanisms that transmit movement from the engine to the foot links. This will help ensure reliable and efficient operation of the device. In addition, the modeling results will be used to design the main structural elements of the robot, such as hinges, fasteners, shock absorbers, etc.

Conclusion. The results of mathematical modeling allow us to calculate the robot's drive system - a set of mechanisms that transmit movement from the engine to the foot links. This will help ensure reliable and efficient operation of the device. In addition, the modeling results will be used to design the main structural elements of the robot, such as hinges, fasteners, shock absorbers, etc. This will allow us to create a durable and long-lasting device that can perform its functions in various operating conditions.

Keywords: rehabilitation exoskeleton; mechanotherapy device; ankle joint; two-link foot; control system; input signals; Fourier series.

Funding: The work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation grant No. 24-29-00467 "Models and algorithms for the development of active-passive mechanotherapy devices".

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

For citation: Jatsun S.F., Kislyak L.B., Saveleva E.V., Fursov G.A. Models and algorithms for the formation of commanding influences of the control system of the rehabilitation exoskeleton two-link foot. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;14(4):60–77. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-60-77>

Received 14.10.2024

Accepted 12.11.2024

Published 27.12.2024

Введение

Проблему реабилитации, социальной защиты и адаптации людей с двигательными нарушениями [1], без сомнения, можно отнести к одной из важных медико-социальных проблем здравоохранения [2]. При назначении реабилитационных мероприятий [3] важно определить степень наличия у больного реабилитационного потенциала [4]. Существующие [4] и разрабатываемые медицинские двигательные тренажёры [5; 6] помогают восстановить функцию ходьбы [7]. Успешность решения этой проблемы [8] определяется, прежде всего, наличием материально-технической базы [9], оснащенной специальными биоизмерительными устройствами [10], обеспеченными развитыми программными алгоритмами [11]. С внедрением в практическую медицину экспериментальных методов, основанных на применении систем технического зрения [12] и компьютерного анализа [13], появляется качественно новый подход, позволяющий расширить диагностические возможности оценки поступающей информации [14], что, в свою очередь, дает возможность разрабатывать более эффективные

тренажеры [15], в которые будут заложены параметры реабилитации, соответствующие двигательным паттернам здорового человека [16]. Все это обуславливает необходимость дальнейших научных исследований, направленных на разработку методов и средств комплексной оценки параметров двигательной физической реабилитации с использованием биомедицинских и естественных физиологических показателей [1].

Один из методов, который может помочь пациентам с повреждениями опорно-двигательного аппарата вернуться к активной жизни, – применение реабилитационных экзоскелетов нижних конечностей [4]. Роботизированные экзоскелетные комплексы нижних конечностей надеваются на нижние конечности пациента, проходящего реабилитацию [8], и позволяют выполнять естественные физиологические движения: подъём конечности, вертикализацию пациента, приседания, в т. ч. на разных этапах реабилитации реализовывать статическую и динамическую походку [1].

Исследования подтверждают, что имитация естественных движений может помочь восстановить нейронные связи. Поэтому в реабилитации важна качественная механотерапия [8].

Целью данной работы является повышение эффективности реабилитации за счет разработки математической модели движения двухзвенной активной стопы роботизированного экзоскелетного комплекса.

Материалы и методы

Для разработки математической модели устройства, решения прямой и обратной задач кинематики была проведена серия экспериментов с целью получения траекторий движения характерных точек стопы человека в процессе ходьбы.

Рассмотрим положение характерных точек стопы человека и экзоскелета (рис. 1, 2).

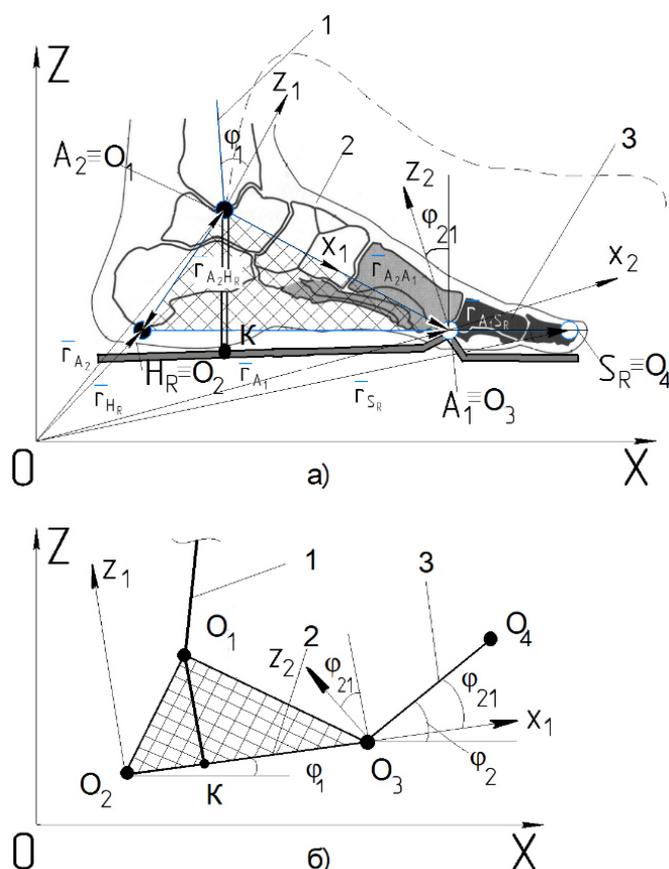


Рис. 1. Схема расположения ключевых точек: а – на стопе человека: A_2 – голеностопный сустав; A_1 – плюсневый сустав; S_R – крайняя точка большого пальца; H_R – крайняя точка предплюсны; б – на активной стопе экзоскелета: O_1 – голеностопный шарнир; O_3 – плюсневый шарнир; O_4 – крайняя точка звена пальцев; O_2 – крайняя точка активной стопы (пяточная); 1 – звено голени; 2 – звено предплюсны; 3 – фаланги пальцев

Fig. 1. The layout of the key points: а – on the human foot: A_2 – ankle joint; A_1 – metatarsal joint; S_R – extreme point of the thumb; H_R – extreme tarsal point; б – on the active foot of the exoskeleton: O_1 – ankle ball-joint; O_3 – metatarsal joint; O_4 – extreme point of the finger link; O_2 – extreme point of the active feet (calcaneal); 1 – shin joint; 2 – tarsal joint; 3 – phalanges of fingers

Одной из ключевых задач при анализе походки пациента является установление зависимости углов поворота звеньев стопы, поэтому рассмотрим подробнее кинематику движения стопы экзоскелета, считая, что стопа пациента неподвижна относительно звеньев стопы экзоскелета [7].

Определение положения реперных (опорных) точек стопы экзоскелета. Определим положение точек O_1, O_2, O_3, O_4 в системе координат OXZ в сагиттальной плоскости. Радиус – вектор, определяющий положение пятки (точка O_2):

$$\begin{aligned}\bar{r}_{O_2} &= (X_{O_2}, Z_{O_2})^T, \\ \bar{r}_{O_2} &= \bar{r}_{O_1} + \bar{r}_{O_1O_2}, \\ \bar{r}_{O_1O_2} &= T_{10} \bar{r}_{O_1O_2}^{(1)},\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}T_{10} &= \begin{bmatrix} \cos(\varphi_1) & -\sin(\varphi_1) \\ \sin(\varphi_1) & \cos(\varphi_1) \end{bmatrix}, \\ \bar{r}_{O_1O_2}^{(1)} &= (O_1O_{2x}, O_1O_{2z})^T,\end{aligned}\quad (2)$$

где O_1O_{2x}, O_1O_{2z} – персонафицированные параметры стопы пациента.

Радиус – вектор, определяющий положение шарнира плюсне – фалангового сустава (точка O_3):

$$\begin{aligned}\bar{r}_{O_3} &= (X_{O_3}, Z_{O_3})^T, \\ \bar{r}_{O_3} &= \bar{r}_{O_1} + \bar{r}_{O_1O_3},\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}\bar{r}_{O_1O_3} &= T_{10} \bar{r}_{O_1O_3}^{(1)}, \\ \bar{r}_{O_1O_3}^{(1)} &= (O_1O_{3x}, O_1O_{3z})^T,\end{aligned}\quad (4)$$

где O_1O_{3x}, O_1O_{3z} – персонафицированные параметры стопы пациента.

Радиус – вектор, определяющий положение крайней точки звена пальцев (точка O_4):

$$\begin{aligned}\bar{r}_{O_4} &= (X_{O_4}, Z_{O_4})^T, \\ \bar{r}_{O_4} &= \bar{r}_{O_3} + \bar{r}_{O_3O_4},\end{aligned}\quad (5)$$

где $\bar{r}_{O_3O_4} = T_{10} \bar{r}_{O_3O_4}^{(1)}$, $\bar{r}_{O_3O_4}^{(1)} = T_{21} \bar{r}_{O_3O_4}^{(2)}$.

$$\begin{aligned}T_{21} &= \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{21}) & -\sin(\varphi_{21}) \\ \sin(\varphi_{21}) & \cos(\varphi_{21}) \end{bmatrix}, \\ \bar{r}_{O_3O_4}^{(2)} &= (O_3O_4, 0)^T,\end{aligned}\quad (6)$$

где O_3O_4 – персонафицированные параметры стопы пациента.

Полученные выражения (1) – (3) позволяют определить положение реперных точек стопы экзоскелета при ходьбе. Для этого необходимо экспериментально найти $\bar{r}_{O_1}(t)$ и $\varphi_1(t), \varphi_{21}(t)$, т. е. решить прямую задачу кинематики. Обратную задачу кинематики можно сформулировать следующим образом: необходимо определить углы, на которые поворачиваются звенья стопы экзоскелета $\varphi_1(t), \varphi_{12}(t)$ при ходьбе по заданным радиус – векторам $\bar{r}_{O_2}, \bar{r}_{O_3}, \bar{r}_{O_4}$.

Рассмотрим способ определения зависимостей $\varphi_1(t), \varphi_{21}(t)$ на основе экспериментально-теоретического метода. Идея метода состоит в экспериментальном определении траекторий движения точек O_1, O_2, O_3, O_4 при ходьбе. Далее по полученным траекториям определяются параметры ряда Фурье для проекций этих точек в системе координат OXZ . На следующем этапе происходит определение зависимостей, определяющих задающие воздействия приводов $\varphi_1(t), \varphi_{21}(t)$ по следующим формулам:

$$\varphi_1 = \arctg \frac{Z_{O_3} - Z_{O_2}}{X_{O_3} - X_{O_2}}, \quad (7)$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{Z_{O_4} - Z_{O_3}}{X_{O_4} - X_{O_3}}, \quad (8)$$

$$\varphi_{21} = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (9)$$

В рамках эксперимента на испытуемом были закреплены маркеры, положение которых соответствовало оси вращения тазобедренного O_b , коленного O_k , голеностопного O_1 , плюсневых O_3 суставов и положению носка стопы O_4 и пятки O_2 (рис. 2, а).

В экспериментах использовался элемент системы технического зрения – web-камера HD-4310 (HP Inc.) с разрешением 1920×1080 пикселей и частотой 30 кадров в секунду. Изображение с

камеры обрабатывалось на ПК с использованием функций библиотеки с открытым исходным кодом Open CV.

Испытуемый проходил с фиксированной длиной шага на расстоянии 2,2 м от камеры. Для каждого испытуемого подбирали несколько комфортных темпов. По видео определяются основные параметры походки: ширина шага S , высота подъёма ноги над опорной поверхностью h и время полного шага t . Испытуемому было предложено идти прогулочным шагом по беговой дорожке. Перед съёмкой проводилась адаптация к условиям эксперимента. Во время видеосъёмки испытуемый безостановочно в спокойном темпе перемещался по беговой дорожке, участок которой попадал в кадр (рис. 2).

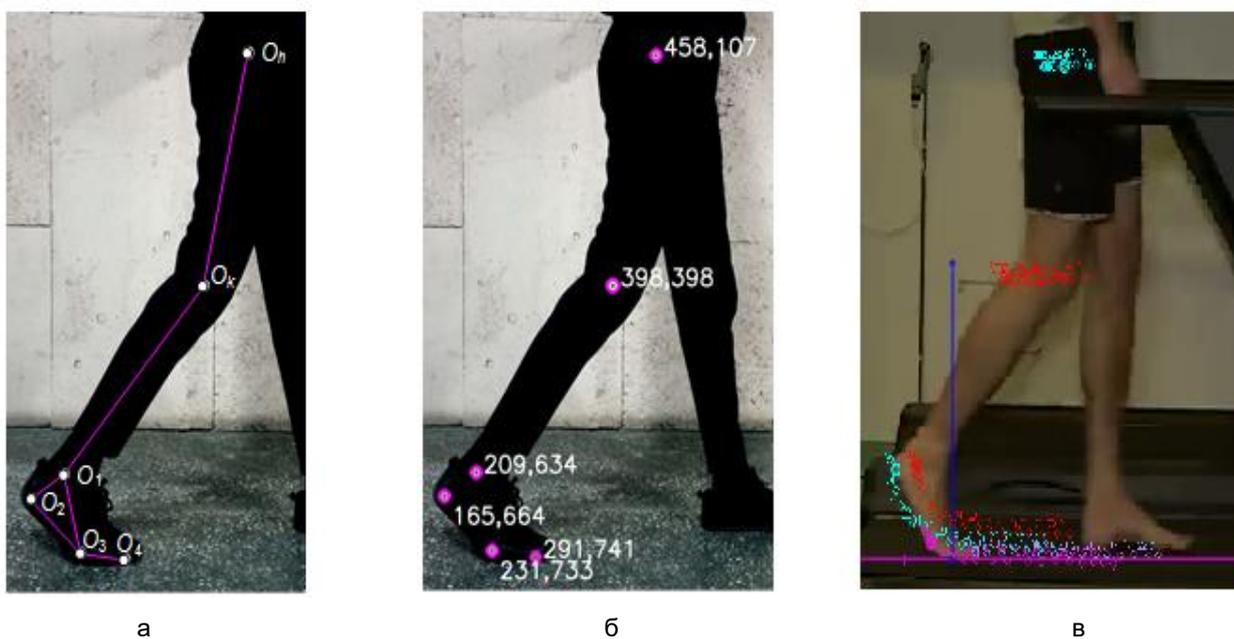


Рис. 2. Экспериментальные исследования движения характерных точек стопы в процессе ходьбы: а – расположение маркеров и принятые обозначения; б – определение координат с помощью СТЗ; в – получение первичных траекторий с использованием функции cv. Hough Circles

Fig. 2. Experimental studies of the movement of characteristic points of the foot during walking: а – location of markers and accepted designations; б – determination of coordinates using STS; в – obtaining primary trajectories using the cv. Hough Circles function

Организация эксперимента (освещение, фон и т. д.) позволила точно регистрировать положения маркеров круглой формы при использовании функции `cv.HoughCircles` библиотеки `OpenCV` с последующей фильтрацией медианным фильтром.

После предварительной обработки данные, поступившие с СТЗ, формировали естественные траектории движения точек при ходьбе. Чтобы получить максимально естественную траекторию движения характерных точек стопы в пространстве, ограничения темпа шага не были строгими.

В результате серии проведенных экспериментов был получен ряд траекторий, из которых была построена усредненная траектория движения характерных точек стопы (рис. 3). При движении по ровной поверхности траектории были бы разомкнутыми. Замкнутость полученных линий траектории обусловлена цикличностью перемещения характерных точек стопы, что, в свою очередь, является прямым следствием использования в эксперименте беговой дорожки и естественным смещением стопы относительно камеры (рис. 3).

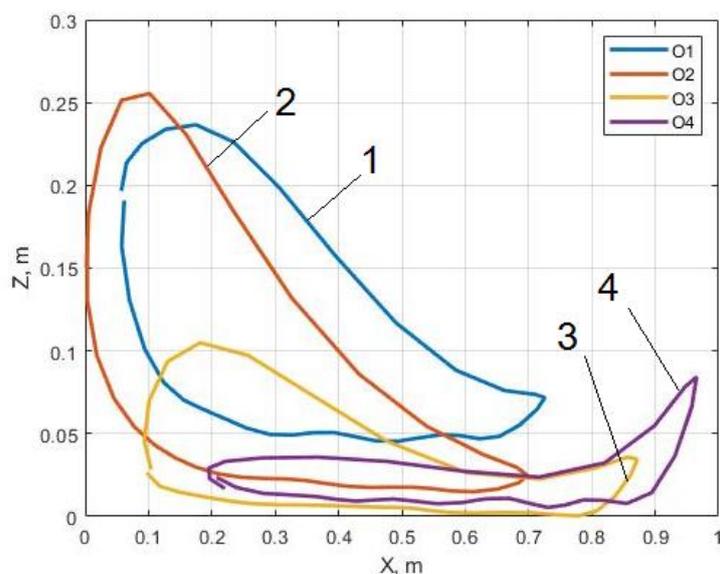


Рис. 3. Усредненная траектория движения характерных точек стопы в пространстве: 1 – O_1 (ГСС); 2 – O_2 (пяточная кость); 3 – O_3 (плюсневый сустав); 4 – O_4 (носок)

Fig. 3. Average trajectory of characteristic points of the foot in space: 1 – O_1 (GSS); 2 – O_2 (heel); 3 – O_3 (metatarsal joint); 4 – O_4 (toe)

Чтобы применить математическую модель (1), нужно оцифровать полученные траектории и найти законы изменения проекций $x(t), y(t)$ с помощью интерполяции. Для этого можно использовать метод подбора полиномиально-кусочных

функций на основании вектора параметров походки $\bar{s} = (s, h_s, H_s, k_v, T_s)^T$, в котором s – длина шага; h_s – высота подъема ноги при ходьбе; H_s – расстояние от тазобедренного шарнира до беговой дорожки; T_s – длительность одного шага

[3]. Для решения этой задачи был использован пакет Curve Fitting Tool в среде MATLAB. В результате аппроксимации с помощью ряд Фурье 5-го порядка была получена гладкая траектория для каждой характерной точки стопы.

Для того чтобы задать траекторию движения воспользуемся функцией Фурье 5-го порядка для каждой естественной координаты в начальной точке положения времени t_0 и конец на момент времени t_k .

Ряд Фурье 5-го порядка имеет следующий вид:

$$X(t) = x_0 + \sum_{i=0}^5 A_i \sin(i\omega + \varphi_i). \quad (10)$$

Аналогично запишется и для координат Z .

Далее составлялась программа численного моделирования в среде Matlab, позволяющая задать траекторию движения звеньев стопы. Используемый алгоритм позволяет получить гладкую траекторию движения (рис. 4).

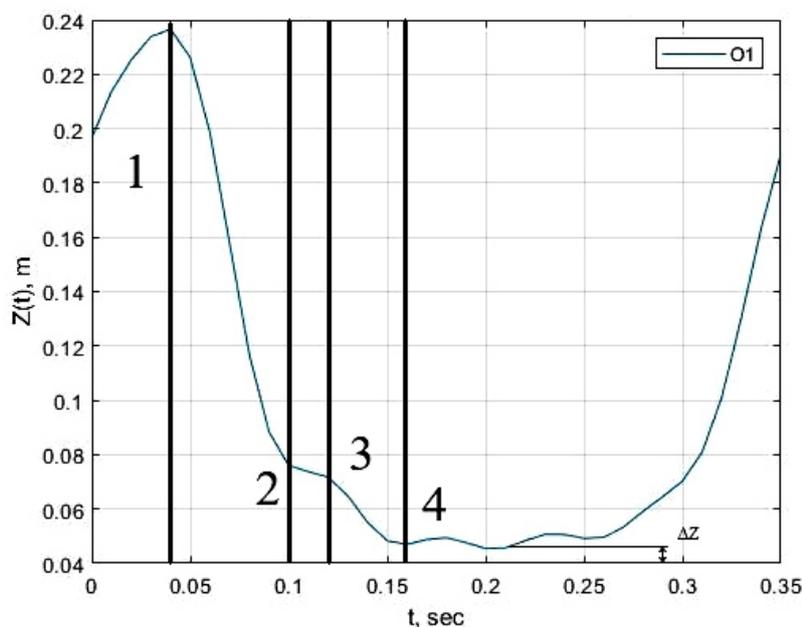


Рис. 4. Траектория движения $Z(X)$ голеностопного сустава O_1 по оси (траектория аппроксимирована функцией Фурье 5-го порядка)

Fig. 4. Graph of the trajectory $Z(X)$ of the O_1 joint (trajectory approximated by reduced 5th order Fourier)

На рисунке 4 итогом завершения каждого этапа становится соответственно: 1 – ГСС достигает верхней критической точки; 2 – пяточный сустав касается ленты беговой дорожки; 3 – перекач стопы по беговой дорожке; 4 – стопа полностью на ленте беговой дорожки;

ΔZ – смещение относительно плюсневого сустава по оси Z . Аналогичным образом были получены траектории для остальных характерных точек стопы (пятка, плюсневый сустав, носок) (рис. 5–7).

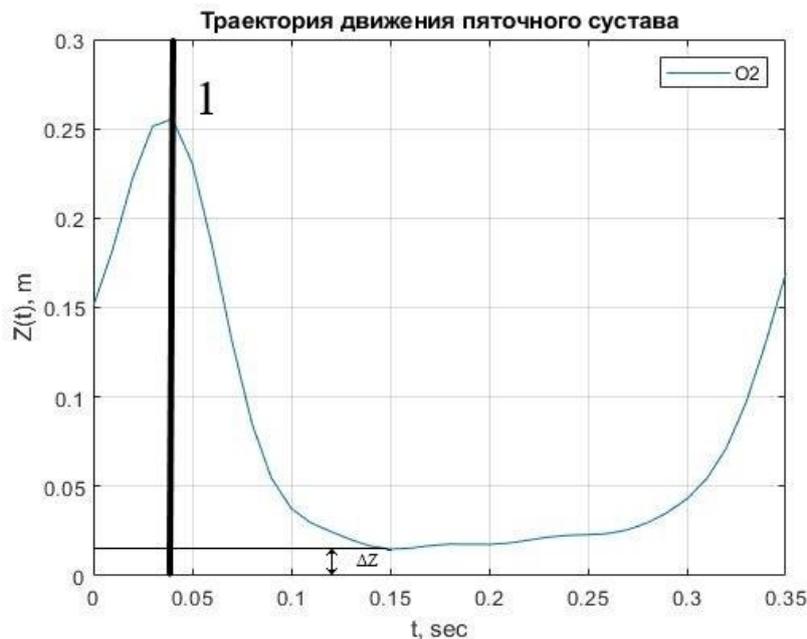


Рис. 5. Траектория движения $Z(X)$ пяточного сустава O_2 (траектория аппроксимирована функцией Фурье 5-го порядка)

Fig. 5. Graph of the trajectory $Z(X)$ of the O_2 joint (trajectory approximated by reduced 5th order Fourier)

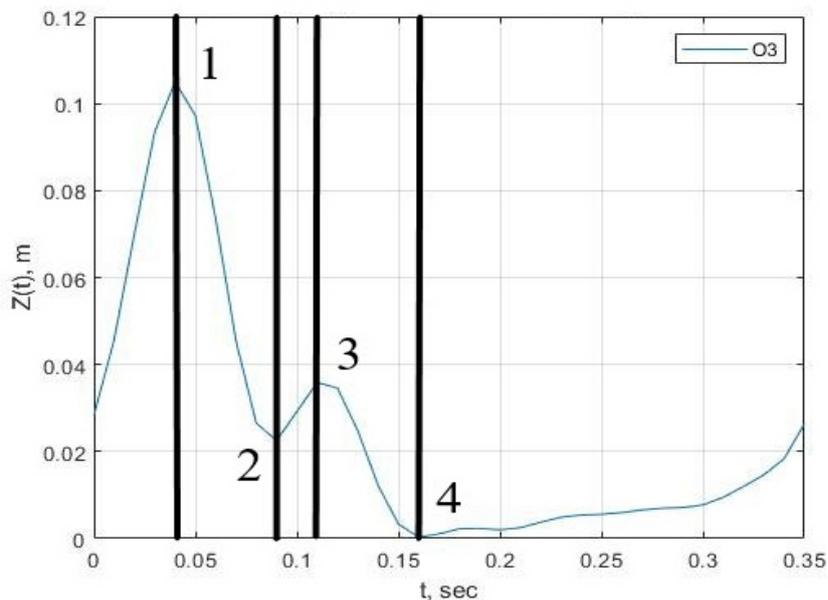


Рис. 6. Траектория движения $Z(X)$ плюсневого сустава O_3 (траектория аппроксимирована функцией Фурье 5-го порядка)

Fig. 6. Graph of the trajectory $Z(X)$ of the O_3 joint (trajectory approximated by reduced 5th order Fourier)

На рисунке 5 этап 1 – стопа достигает верхней критической точки, ΔZ –

смещение относительно плюсневого сустава по оси Z .

На рисунке 6 этап 1 – стопа достигает верхней критической точки, этап 2 – плюсневый сустав касается ленты беговой дорожки, этап 3 – пережат стопы по ленте беговой дорожки, этап 4 – стопа полностью касается ленты беговой дорожки.

На рисунке 7 этап 1 – фаланги пальцев касаются беговой дорожки, этап 2 – пережат стопы по ленте беговой дорожки, этап 3 – стопа лежит на ленте беговой дорожки, ΔZ – смещение относительно плюсневого сустава по оси Z .

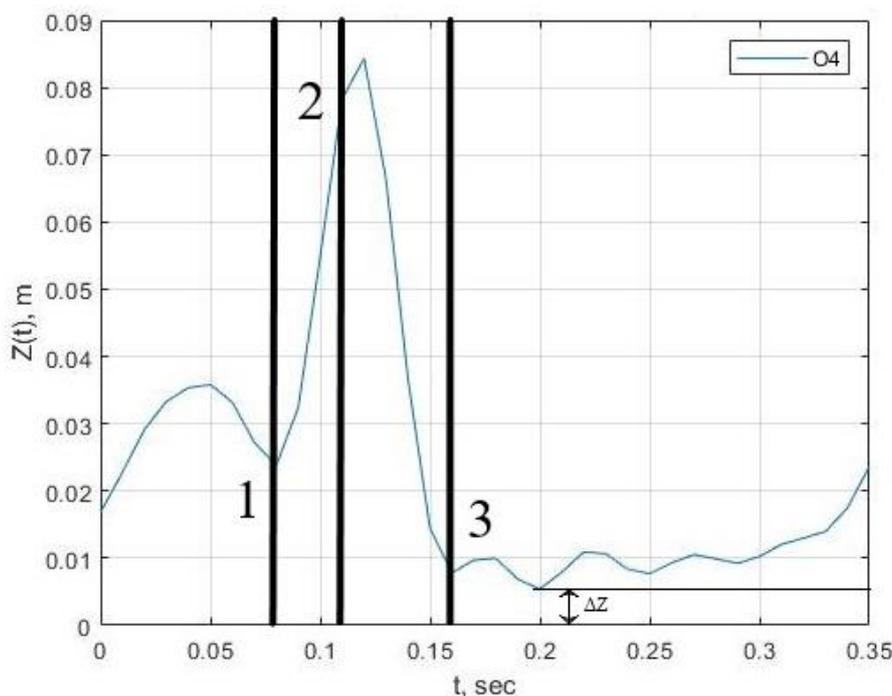


Рис. 7. Траектория движения $Z(X)$ плюсневого сустава O_4 (траектория аппроксимирована функцией Фурье 5-го порядка)

Fig. 7. Graph of the trajectory $Z(X)$ of the O_4 joint (trajectory approximated by reduced 5th order Fourier)

Как показали результаты сравнительного анализа исходных данных и данных, полученных на основе полиномиальных функций, использованный подход дает удовлетворительную точность. Максимальная относительная ошибка – 0,53%, средняя квадратичная ошибка – 0,0071% для значений параметров, близких к параметрам эксперимента.

Результаты и их обсуждение

Поскольку полученная функция на основе рядов Фурье 5-го порядка характеризуется набором из 11 коэффициентов, установить связь между изменением траектории по параметрам шага (длина шага, высота шага, скорость шага) достаточно сложно. На рисунке 8 показан подбор коэффициентов ряда Фурье.

$$\begin{aligned}
 a_0 &= 0.3753; \\
 a_1 &= -0.2771; \\
 b_1 &= 0.115; \\
 a_2 &= -0.05015; \\
 b_2 &= -0.05966; \\
 a_3 &= 0.01651; \\
 b_3 &= -0.008539; \\
 a_4 &= -0.001633; \\
 b_4 &= 0.009761; \\
 a_5 &= -0.005892; \\
 b_5 &= -0.002068; \\
 w &= 18.34;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x_a &= a_0 + a_1 \cos(x \cdot w) + b_1 \sin(x \cdot w) + \dots \\
 &+ a_2 \cos(2 \cdot x \cdot w) + b_2 \sin(2 \cdot x \cdot w) + a_3 \cos(3 \cdot x \cdot w) + b_3 \sin(3 \cdot x \cdot w) + \dots \\
 &+ a_4 \cos(4 \cdot x \cdot w) + b_4 \sin(4 \cdot x \cdot w) + a_5 \cos(5 \cdot x \cdot w) + b_5 \sin(5 \cdot x \cdot w);
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_0 &= 0.1017; \\
 a_1 &= 0.07247; \\
 b_1 &= 0.04041; \\
 a_2 &= 0.02093; \\
 b_2 &= 0.03371; \\
 a_3 &= 0.0002362; \\
 b_3 &= 0.01446; \\
 a_4 &= -0.00436; \\
 b_4 &= 0.0006468; \\
 a_5 &= 0.0008371; \\
 b_5 &= -0.005167; \\
 a_6 &= 0.004781; \\
 b_6 &= -0.001599; \\
 w &= 17.82;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 z_a &= a_0 + a_1 \cos(x \cdot w) + b_1 \sin(x \cdot w) + \dots \\
 &+ a_2 \cos(2 \cdot x \cdot w) + b_2 \sin(2 \cdot x \cdot w) + a_3 \cos(3 \cdot x \cdot w) + b_3 \sin(3 \cdot x \cdot w) + \dots \\
 &+ a_4 \cos(4 \cdot x \cdot w) + b_4 \sin(4 \cdot x \cdot w) + a_5 \cos(5 \cdot x \cdot w) + b_5 \sin(5 \cdot x \cdot w) + \dots \\
 &+ a_6 \cos(6 \cdot x \cdot w) + b_6 \sin(6 \cdot x \cdot w);
 \end{aligned}$$

Рис. 8. Коэффициенты ряда Фурье

Fig. 8. Fourier series coefficients

Наличие нелинейных и тригонометрических слагаемых в уравнении не позволяет получить аналитического выражения, поэтому для определения кинематических и динамических параметров

устройства прибегнем к численному моделированию системы [13].

При моделировании воспользуемся параметрами модели, указанными ниже (табл. 1).

Таблица 1. Исходные параметры модели

Table 1. Initial parameters of the model

Параметр модели	Обозначение	Значение параметра
Масса звена O_2O_3 , кг	m_2	2,3
Масса звена O_3O_4 , кг	m_3	0,8
Длина звена O_2O_3 , м	l_2	0,175
Длина звена O_3O_4 , м	l_3	0,1
Длина шага относительно ГСС, м	S	0,6
Скорость шага 1 км/ч	V_1	1,5
Скорость шага 2 км/ч	V_2	2,5
Высота шага 1 м	H_1	0,125
Высота шага 2 м	H_2	0,18

Временная диаграмма изменения абсолютных углов ϕ_1 , ϕ_2 для точек O_1 и

O_3 и относительного угла ϕ_{21} имеют следующий вид (рис. 9–11).

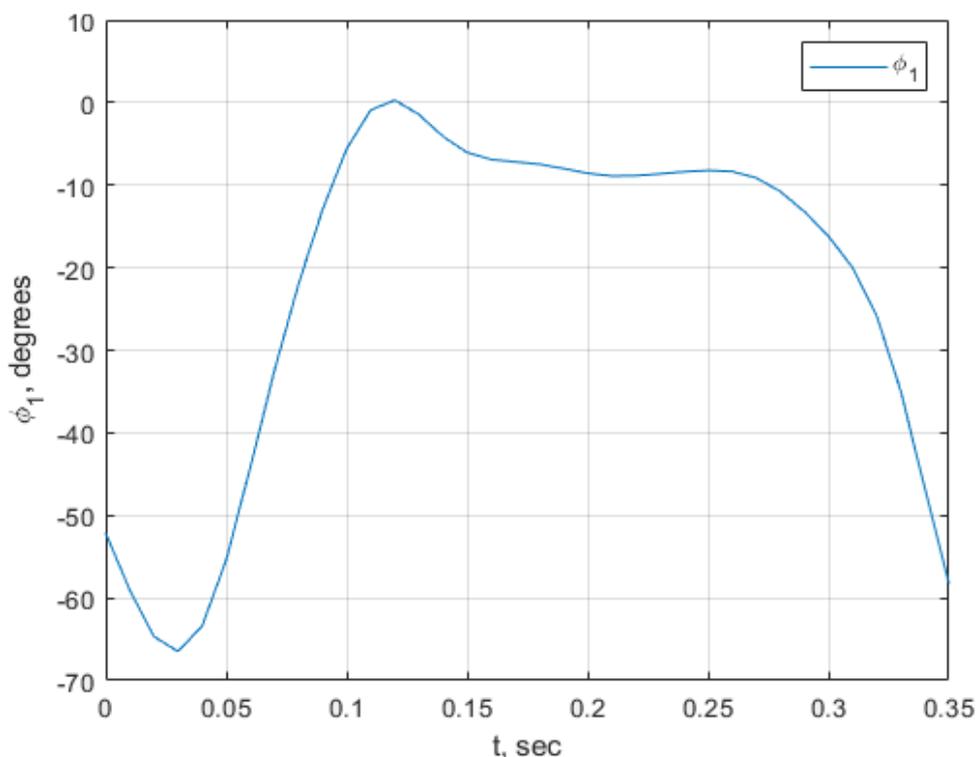


Рис. 9. Закон изменения абсолютного угла ϕ_1

Fig. 9. Law of the absolute angle ϕ_1 change

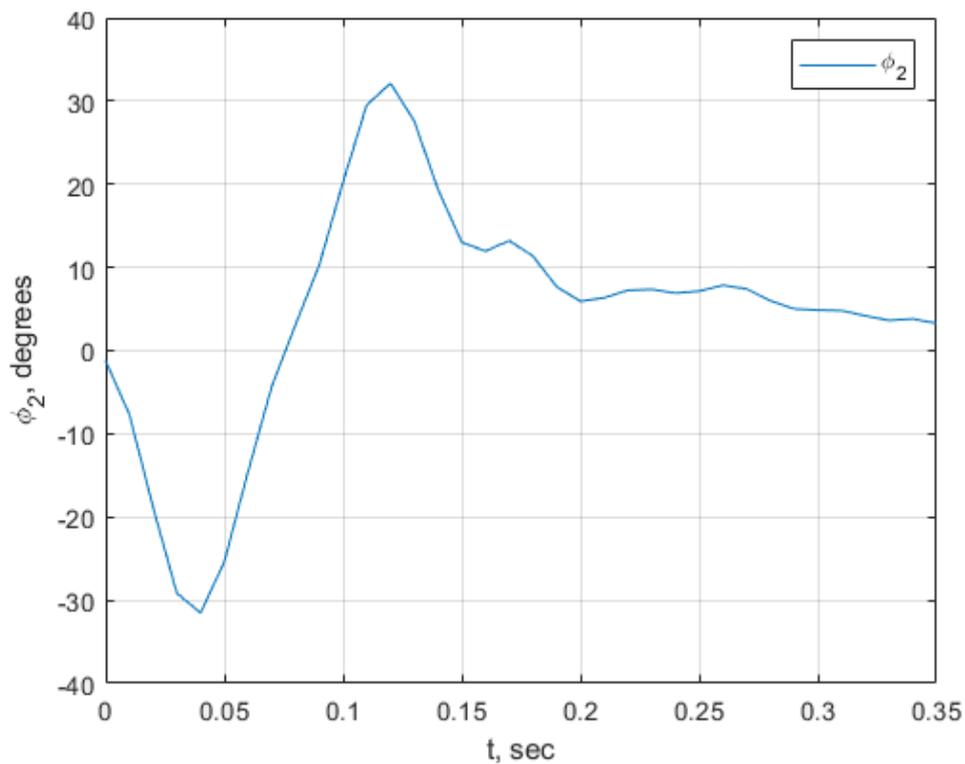


Рис. 10. Закон изменения угла ϕ_2

Fig. 10. Law of the absolute angle ϕ_2 change

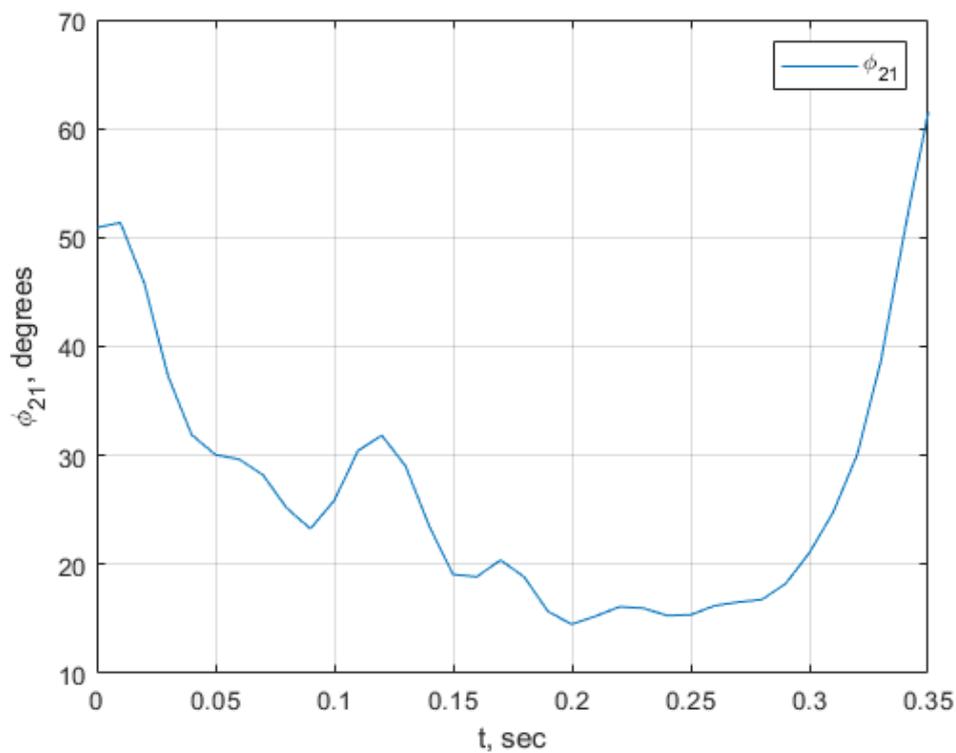


Рис. 11. Закон изменения угла ϕ_2

Fig. 11. Law of the relative angle ϕ_2 change

Индивидуальные физиологические параметры пациента используются для определения параметров персонализированной настройки экзоскелетного комплекса перед началом реабилитационных процедур, включая геометрические параметры и положения опорных точек O_1 , O_2 , O_3 , O_4 и длины звеньев стопы пациента (рис. 1), а также длину и высоту шага (табл.1).

При наличии сведений о геометрических параметрах человеко-машинной системы полученные функции изменения углов поворота звеньев $\varphi_i(t)$ представляют собой независимые обобщенные координаты, значения двух из которых в рассматриваемый момент времени могут однозначно характеризовать положение звеньев моделируемой системы [17]. Полученные траектории, снятые при изучении походки здорового человека в спокойном темпе [18], позволят настроить работу устройства таким образом, чтобы обеспечить наиболее эффективные параметры реабилитации [19; 20].

Выводы

Разработана математическая модель движения звеньев стопы робота. В ней подробно описаны уравнения, алгоритм и результаты вычислительных экспериментов.

Модель позволяет анализировать и прогнозировать движение стопы робота в различных условиях. Она учитывает такие параметры, как масса, момент инерции, длина шага, высота подъёма ноги и другие характеристики.

Результаты математического моделирования позволяют рассчитать приводную систему робота – совокупность механизмов, передающих движение от двигателя к звеньям стопы. Это поможет обеспечить надёжную и эффективную работу устройства.

Результаты моделирования будут использованы для проектирования основных конструктивных элементов робота, таких как шарниры, крепления, амортизаторы и т. д.

Список литературы

1. Давыдов В. К. Особенности механики рабочего прототипа реабилитационного экзоскелета нижних конечностей // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2023. № 4-1(79). С. 77–82.
2. Котов Е. А., Друк А. Д., Клыпин Д. Н. Разработка экзоскелета нижних конечностей человека для медицинской реабилитации // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 91–97. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2021-178-91-97>
3. Оценка эффективности восстановления навыков ходьбы с помощью реабилитационного роботизированного комплекса / И. Э. Юденко, А. И. Попова, Ю. Е. Викторова,

Н. В. Минникаева // Северный регион: наука, образование, культура. 2023 № 3(55). С. 77–83.

4. Yatsun S. M., Yatsun A. S., Rukavitsyn A. N. The creation of a biomechatronic orthopedic device for the treatment of flat feet // Biomedical engineering. 2021. Vol. 54, N 5. P. 361–365.

5. Будко Р. Ю., Чернов Н. Н., Будко Н. А. Метод управления устройствами замещения утраченных функций на основе миосигнала и его верификация в реальном масштабе времени // Вестник молодёжной науки России. 2019. № 6. С. 12.

6. Куст С. Ю., Маркова М. В., Писарева А. В. Разработка алгоритма определения местности в системе управления протезом нижней конечности // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2021. Т. 20, № 2. С. 99–105.

7. Арбиева М. В. Задачи реиннервации и обработки эмг-сигнала в разработке биоэлектрического протеза // Молодежный научный вестник. 2018. № 4(29). С. 71–77.

8. Князев А. А., Яцун С. Ф., Федоров А. В. Управление прибором для механотерапии голеностопного сустава // Медицинская техника. 2022. № 6(336). С. 14.

9. Zaichenko K. V., Gurevich B. S. Spectral processing of bioelectric signals // Medical equipment. 2021. N 1(325). P. 12–14.

10. Баталов А. В., Веселов О. В. Обработка биоэлектрических сигналов для управления активным экзоскелетом ног // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 5. С. 23–27.

11. Samsonov I., Taratonov I. Modular Scalable System for Registration of Biomedical Indicators of Activity of the Exoskeleton User // Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 647–655.

12. Смирнова Л. М., Пономаренко Г. Н., Сусяев В. Г. Методология и информационно-измерительная система для персонализированного синтеза протезов нижних конечностей // Информационно-управляющие системы. 2021. № 6. С. 64–74. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-64-74>

13. Simulation of Interaction between an Operator and an Exoskeleton / S. F. Yatsun, A. S. Yatsun, E. V. Savel'eva, A. E. Karlov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. N 49. P. 490–499.

14. Analysis of the effect of the exoskeleton geometrical dimensions on the nature of a linear compensator operation / S. F. Yatsun, V. E. Pavlovsky, A. E. Karlov, Al Manji Kh Kh M., A. S. Yatsun, E. V. Saveleva // 12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE). Kazan: IEEE, 2019. P. 466–471.

15. Yatsun S., Saveleva E., Al Manji K. H. M. Research Into Impact of Attachment System of Exoskeleton Link to Human Body on Efficiency of its Application // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi: IEEE, 2019. P. 1–5.

16. Провоторов Н. В., Таратонов И. Н., Филиппович Ю. Н. Метод межсегментной оценки выделения паттернов движения из кинематических траекторий, регистрируемых средствами экзоскелетной системы // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35, № 3. С. 493–501.

17. Modelling for design and evaluation of industrial exoskeletons: A systematic review / T. Ma, Y. Zhang, S. D. Choi, S. Xiong // Applied Ergonomics. 2023. N 113. P. 104100.

18. Varlamova L. P., Farukh N. Xo'jaqulov. Simulation of a two-link manipulator // Scientific Progress. 2022. N 3. P. 1107–1111.

19. Смирнова Л. М. Комплексное поэтапное моделирование биотехнической системы при оценке эффективности и настройке протеза нижней конечности // Информационно-управляющие системы. 2009. № 3. С. 29–33.

20. Evaluation of the EEG identification potential using a statistical approach and convolutional neural networks / A. E. Sulavko, P. S. Lozhnikov, A. G. Choban, D. G. Stadnikov, A. A. Nigrey, D. P. Inivatov // Information and control systems. 2020. N 6. P. 37–49. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-6-37-49>

Reference

1. Davydov V.K. Features of the mechanics of the working prototype of the rehabilitation exoskeleton of the lower limbs. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i yestestvennykh nauk = International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2023;(4-1):77–82. (In Russ.)

2. Kotov Y.A., Druk A.D., Klypin D.N. Development of an exoskeleton of the human lower limbs for medical rehabilitation. *Omskiy nauchnyy vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2021;(4):91–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2021-178-91-97>

3. Yudenko I.E., Popova A.I., Viktorova Y.Y., Minnikayeva N.V. Evaluation of the effectiveness of walking skill restoration using a rehabilitation robotic complex. *Severnnyy region: nauka, obrazovaniye, kul'tura = Northern Region: Science, Education, Culture*. 2023;(3):77–83. (In Russ.)

4. Yatsun S.M., Yatsun A.S., Rukavitsyn A.N. The creation of a biomechatronic orthopedic device for the treatment of flat feet. *Biomedical Engineering*. 2021;54(5):361–365.

5. Budko R.Y., Chernov N.N., Budko N.A. A method for controlling devices for replacing lost functions based on myosiganal and its verification in real time. *Vestnik molodozhnoy nauki Rossii = Bulletin of Youth Science of Russia*. 2019;(6):12. (In Russ.)

6. Kust S.Y., Markova M.V., Pisareva A.V. Development of an Algorithm for Determining the Terrain in a Lower Limb Prosthesis Control. *Systemistemnyy analiz i upravleniye v biomeditsinskikh sistemakh = Systems Analysis and Control in Biomedical Systems*. 2021;20(2):99–105. (In Russ.)

7. Arbiyeva M.V. Tasks of Reinnervation and Processing of the EMG Signal in the Development of a Bioelectric Prosthesis. *Molodezhnyy nauchnyy vestnik = Youth Scientific Bulletin*. 2018;(4):71–77. (In Russ.)
8. Knyazev A.A., Yatsun S.F., Fedorov A.V. Control of a Device for Mechanotherapy of the Ankle Joint. *Meditinskaya tekhnika = Medical Equipment*. 2022;(6):14. (In Russ.)
9. Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Spectral processing of bioelectric signals. *Meditinskaya tekhnika = Medical Equipment*. 2021;(1):12–14.
10. Batalov A.V., Veselov O.V. Processing of bioelectric signals for controlling an active leg exoskeleton. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii = Modern Science-Intensive Technologies*. 2021;(5):23–27. (In Russ.)
11. Samsonov I., Taratonov I. Modular Scalable System for Registration of Biomedical Indicators of Activity of the Exoskeleton User. In: *Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software*. Cham: Springer International Publishing; 2022. P. 647–655.
12. Smirnova L.M., Ponomarenko G.N., Suslyayev V.G. Methodology and information-measuring system for personalized synthesis of lower limb prostheses. *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy = Information Control Systems*. 2021;(6):64–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-64-74>
13. Yatsun S.F., Yatsun A.S., Savel'eva E.V., Karlov A.E. Simulation of Interaction between an Operator and an Exoskeleton. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020;(49):490–499.
14. Jatsun S.F., Pavlovsky V.E., Karlov A.E., Al Maji Kh Kh M., Yatsun A.S., Saveleva E.V. Analysis of the effect of the exoskeleton geometrical dimensions on the nature of a linear compensator operation. In: *12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*. P. 466–471. Kazan: IEEE; 2019.
15. Jatsun S., Saveleva E., Al Manji K. H. M. Research Into Impact of Attachment System of Exoskeleton Link to Human Body on Efficiency of its Application. *2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. Sochi: IEEE, 2019. P. 1–5.
16. Provotorov N.V., Taratonov I.N., Filippovich Y.N. Intersegment Assessment Method for Extracting Motion Patterns from Kinematic Trajectories Recorded by Exoskeleton Systems. *Programmnyye produkty i sistemy = Software Products and Systems*. 2022;35(3):493–501. (In Russ.)
17. Ma T., Zhang Y., Choi S.D., Xiong S. Modelling for design and evaluation of industrial exoskeletons: A systematic review. *Applied Ergonomics*. 2023;(113):104100.
18. Varlamova L.P., Farukh N. Xo'jaqulov Simulation of a two-link manipulator. *Scientific Progress*. 2022;(3):1107–1111.
19. Smirnova L.M. Integrated step-by-step modeling of a biotechnical system for evaluating the effectiveness and adjusting a lower limb prosthesis. *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy = Information Control Systems*. 2009;(3):29–33. (In Russ.)

20. Sulavko A.E., Lozhnikov P.S., Choban A.G., Stadnikov D.G., Nigrey A.A., Inivatov D.P. Evaluation of the EEG identification potential using a statistical approach and convolutional neural networks. *Information and Control Systems*. 2020;(6):37–49. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-6-37-49>

Информация об авторах / Information about the Authors

Яцун Сергей Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru, Researcher ID: 109404, ORCID: 0000-0002-7420-0772

Sergey F. Yatsun, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru, Researcher ID: 109404, ORCID: 0000-0002-7420-0772

Кисляк Леонид Борисович, аспирант кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kislyakleo@gmail.com

Leonid B. Kislyak, Post-Graduate Student of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kislyakleo@gmail.com

Савельева Екатерина Владимировна, преподаватель кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: katasavelkursk@yandex.ru, Researcher ID: 1147373, ORCID: 0000-0002-7420-0772

Ekaterina V. Saveleva, Lecturer of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: katasavelkursk@yandex.ru, Researcher ID: 1147373, ORCID: 0000-0002-5993-3791

Фурсов Гавриил Анатольевич, магистрант кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: from.skveki1@mail.ru

Gavriil A. Fursov, Undergraduate of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: from.skveki1@mail.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-78-97>



УДК 613.6:613.6.027

Применение ЭМГ для оценки эффективности и безопасности промышленного экзоскелета в трудовой деятельности

А. С. Яцун¹, М. П. Щербакова¹✉, А. В. Мальчиков¹

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

✉ e-mail: 5-storm-7@mail.ru

Резюме

Целью исследования является оценка эффективности и безопасности применения промышленного экзоскелета при помощи ЭМГ в условиях моделирования трудовой деятельности.

Методы. Руководствуясь ГОСТ Р 60.5.3.3-2023 и национальным стандартом РФ ГОСТ Р 60.5.2.1-2023, использованы неинвазивная методика общей оценки состояния кардиореспираторной системы человека, электромиография как ключевой способ оценки биоэлектрической активности мышц, а также проведение интервью с участниками исследований.

Результаты. Полученные в ходе исследования с использованием избранных методов данные продемонстрировали существенные различия между зафиксированными показателями участников, выполнявших задания без ПЭ и с его использованием.

Были получены следующие результаты: во время переноса груза активность локтевого сгибателя запястья при использовании ПЭ снижалась в среднем на 41%, бицепса – на 21%; во время удержания груза активность локтевого сгибателя запястья при использовании ПЭ снижалась в среднем на 42%, бицепса – на 52%.

Эксперименты на выносливость показали снижение активности мышц на 52–42% при использовании ПЭ, что положительно влияет продолжительность комфортной работы, которая увеличилась в среднем в 2,5 раза. Также общее физиологическое состояние участников (пульс, давление, сатурация) при использовании ПЭ было ближе к стандартам, чем без ПЭ.

Согласно ответам участников, все замечали небольшую разницу в пользу использования ПЭ. Особенно заметна помощь ПЭ после ряда выполненных подходов.

Заключение. Проведённое в рамках работы исследование для определения эффективности и безопасности применения ПЭ в процессе трудовой деятельности, в том числе и для нивелирования вреда от стереотипных рабочих движений, показало снижение активности измеряемых мышц при использовании ПЭ, что также говорит о снижении утомляемости человека, чем повышает эффективность его работы.

Ключевые слова: промышленный экзоскелет; плечевой отдел; активность мышц; работа по перемещению / удержанию груза; рабочие движения; эффективность и безопасность; электромиография.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках гранта РНФ «Поиск и теоретическое обоснование новых моделей, алгоритмов и средств создания биотехнических систем на основе “мягких” экзоскелетов» (Соглашение № 23-29-00823).

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Для цитирования: Яцун А. С., Щербакова М. П., Мальчиков А. В. Применение ЭМГ для оценки эффективности и безопасности промышленного экзоскелета в трудовой деятельности // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 4. С. 78–97. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-14-4-78-97>

Поступила в редакцию 08.10.2024

Подписана в печать 07.11.2024

Опубликована 27.12.2024

The use of EMG to assess the effectiveness and safety of an industrial exoskeleton in the workplace

Andrey S. Yatsun¹, Maria P. Shcherbakova¹ ✉, Andrei V. Malchikov¹

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

✉ e-mail: 5-storm-7@mail.ru

Abstract

The purpose of research the work is to evaluate the effectiveness and safety of the use of an industrial exoskeleton using EMG in the conditions of modeling labor activity.

Methods. Guided by GOST R 60.5.3.3-2023 and the national standard of the Russian Federation GOST R 60.5.2.1-2023, a non-invasive technique for the general assessment of the human cardiorespiratory system, electromyography as a key way to assess the bioelectric activity of muscles, as well as conducting interviews with research participants were used.

Results. The data obtained as a result of the study using the selected methods showed significant differences between the registered values of the indicators of volunteers who worked without PE and with its use.

The following results were obtained: during load transfer, the activity of the elbow flexor of the wrist when using IE decreased by an average of 41%, biceps – by 21%; during load retention, the activity of the elbow flexor of the wrist when using IE decreased by an average of 42%, biceps – by 52%.

Endurance experiments showed a 52-42% decrease in muscle activity when using IE, which positively affects the duration of comfortable work, which increased by an average of 2.5 times.

Also, the general physiological condition of the volunteers (pulse, pressure, saturation) when using IE was closer to the standards than without IE.

According to the responses of the volunteers, everyone noticed a slight difference in favor of using IE. IE's help is especially noticeable after a number of completed approaches.

Conclusion. A study conducted within the framework of the work to determine the effectiveness and safety of the use of PE in the course of work, including to offset the harm from stereotypical work movements, showed a decrease in the activity of the measured muscles when using PE, which also indicates a decrease in human fatigue, which increases the efficiency of his work.

Keywords: industrial exoskeleton; shoulder section; muscle activity; work on moving / holding cargo; working movements; efficiency and safety; electromyography.

Conflict of interest: The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

For citation: Yatsun A.S., Shcherbakova M.P., Malchikov A.V. The use of EMG to assess the effectiveness and safety of an industrial exoskeleton in the workplace. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;14(4):78–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-78-97>

Received 08.10.2024

Accepted 07.11.2024

Published 27.12.2024

Введение

По данным Росстата, в последние пару лет в России порядка 20,1% занятых официально трудятся на тяжелых работах¹. Несмотря на то, что в настоящее время количество ручного труда, в т. ч. и на тяжёлых производствах, имеет тенденцию на сокращение, в различных отраслях экономики без тяжелого физического труда всё ещё не обойтись. Соответственно физическая нагрузка продолжает оставаться ключевым фактором риска получения травм и развития профессиональных заболеваний, включая патологии опорно-двигательного аппарата [1].

Из-за тяжёлого физического труда работник постоянно подвергается воздействию высоких нагрузок, вследствие чего устаёт, теряет бдительность на фоне усталости и зачастую допускает ошибки, которые могут привести к травматизации в несчастном случае.

По данным Росстата, треть несчастных случаев (порядка 31,2%) фиксируют на предприятиях обрабатывающего производства, которые включают в себя заводы и фабрики, где работники трудятся в цехах. 15% травм приходится на работников в сфере транспортировки и хранения, зачастую это связано с погрузочно-разгрузочными работами и транспортными происшествиями. Около 9,1% производственных несчастных случаев приходится на строительство¹.

Наиболее верным подходом, безусловно, является подход по предупреждению возникновения ситуаций, которые могут приводить к различного рода травмам, но не стоит исключать ситуации, когда предупреждающие меры уже бессильны. В связи с этим проводились направленные в медицинскую сторону исследования. Например, проведённое в 2024 г. исследование группой учёных из разных стран, целью которого было выяснить, насколько хорошо носимый пассивный экзоскелет влияет на координацию движений у пациентов с мозжечковой атаксией. Результатами данного исследования стали: уменьшение медиально-бокового отклонения центра масс, более эффективное поведение тела в передне-заднем направлении, оптимизация расхода энергии, уменьшение коактивации мышц и лучшая координация между активациями мышц [2].

Возвращаясь к промышленности, стоит отметить, что профессиональные заболевания, вызванные физическими перегрузками и переутомлением определенных органов и систем, занимают вторую позицию среди профессиональных патологий в зависимости от воздействия вредных производственных факторов и составляют около 25% [3]. Зачастую страдает поясничный и плечевой отделы, боли в которых могут вызываться различными причинами [4]. Однако в 90% случаев боль связана с заболеваниями

¹ Федеральная служба государственной статистики. URL:<https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 25.09.2024).

позвоночника и мышц спины. Заболевания, возникающие вследствие физической работы и стереотипных (повторяющихся) движений, неизбежны в любой деятельности, связанной с перемещением грузов (Р 2.2.2006-05. Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда).

На основании представленной статистики одним из наиболее актуальных направлений является разработка промышленных экзоскелетов, способных защищать верхние отделы опорно-двигательного аппарата человека от избыточных физических нагрузок [5]. Также значительно снизить риск осложнений от стереотипных движений. В дополнение стоит отметить, что здоровье населения, особенно трудоспособного возраста, положительно повлияет на экономику страны [6].

Медико-биологическая оценка ПЭ имеет важное значение при формировании выводов о их безопасности и физиологической эффективности [7]. Современные подходы к изучению функционального состояния человека, используемые в таких сферах, как медицина труда, спортивная медицина [8], функциональная диагностика, реабилитация и другие области, позволили выбрать следующие методы для данного исследования:

– измерение ключевых биологических параметров как неинвазивный способ комплексной оценки состояния сердечно-легочной системы человека [9];

– электромиография (ЭМГ), являющаяся основным методом изучения биоэлектрической активности мышц [10].

Исходя из сложившейся проблемы данное исследование заключается в оценке безопасности и эффективности использования промышленного экзоскелета в условиях, имитирующих трудовую деятельность, включая выполнение повторяющихся рабочих движений [11].

Материалы и методы

Модель трудовой деятельности была разработана в лабораторных условиях ФГБОУ ЮЗГУ НИЛ «МиР». В основу разработки модели легли показатели тяжести трудовых процессов, а также характеристики рабочих поз и повторяющихся движений, связанных с ручным перемещением и удержанием груза [12]. Условия для моделирования рабочей среды были созданы максимально приближенными к реальным условиям, в которых специалисты выполняют реальные задачи, связанные с перемещением грузов исключительно при помощи только собственной мускульной силы [13].

Рассмотрим модель рабочего места в лабораторных условиях (рис. 1).

Испытываемым образцом являлся промышленный экзоскелет Holdupper (рис. 2), обеспечивающий снижение физических нагрузок на человека и позволяющий улучшить условия труда, снизить травмоопасность и утомляемость при работах с тяжелым ручным инструментом, поднятии, удержании и переносе грузов верхними конечностями [14].

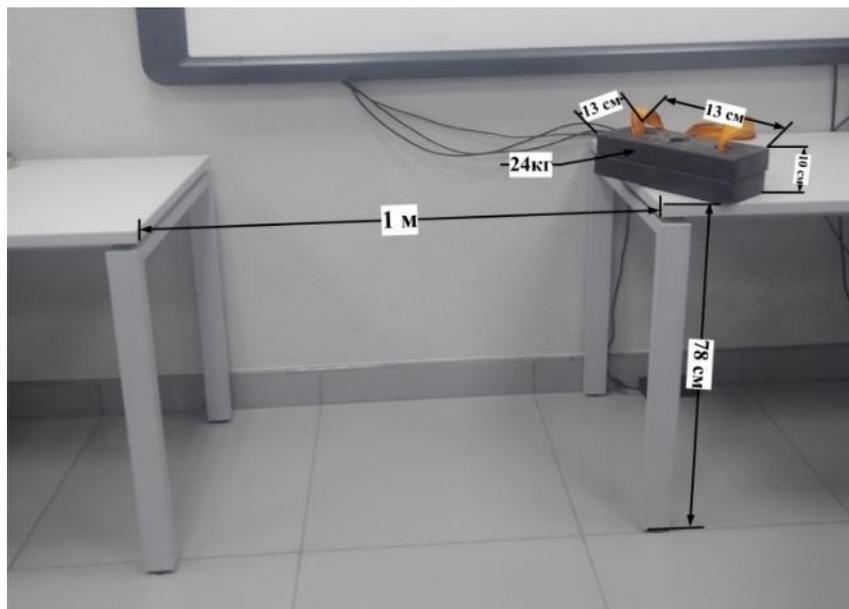


Рис. 1. Модель рабочего места в лабораторных условиях

Fig. 1. Workplace model in laboratory conditions



Рис. 2. Общий вид тестируемого экзоскелета

Fig. 2. General view of the exoskeleton under test

Предназначен для поднятия и переноса грузов на высоте от 0,8 до 1,6 м и разгрузки верхних конечностей, а также плечевого пояса оператора [15].

Для участия в исследовании было приглашено пять участников (добровольцев) из числа молодых и здоровых мужчин в возрасте 20 ± 1 год со следующими

показателями: рост $180,0 \pm 5$ см; массой тела $81,0 \pm 10,5$ кг; индекс массы тела в диапазоне 23–26,7.

Все они прошли медицинские осмотры, подтвердившие отсутствие у них каких-либо заболеваний. Каждый участник моделировал трудовую деятельность как с применением промышленного экзоскелета, так и без него.

Для определения безопасности применения ПЭ как первостепенно важного фактора отслеживалось и оценивалось общее состояние участников посредством визуального осмотра, измерения базовых показателей функционального состояния и проведения интервью (оценки по 10-балльной шкале).

Интервью включало субъективную оценку ощущений во время выполнения движений в поясничной и плечевой зонах, самооценку физического состояния и уровня работоспособности, а также наличие неприятных или болезненных ощущений. Интервьюирование для случаев использования ПЭ включало специальные вопросы, оценивающие следующие параметры [1]:

- оценка самочувствия в сравнении с самочувствием перед началом эксперимента;
- оценка комфортности работы в ПЭ в сравнении с работой без использования ПЭ;
- оценка удобства использования ПЭ во время выполняемой работы;
- оценка удобства использования ПЭ во время отдыха или выполнения операций, отличных от рабочих;
- оценка комфорта и скорости надевания и снятия ПЭ;

– оценка скорости привыкания к использованию ПЭ.

Для определения эффективности использования ПЭ как второстепенно важного фактора оценивались следующие параметры [1]:

- общее состояние участников;
- уровень усталости и психофизиологическое состояние участников на протяжении всего периода моделирования трудовой деятельности (оценка давалась самими участниками);
- показатели кардиореспираторной системы участников;
- утомляемость мышц, задействованных в выполнении рабочих движений;
- показатели координации участников (как статической, так и динамической);
- показателям производительности труда (в рамках теста на продолжительность комфортной работы по удержанию груза на вытянутых вперед руках с использованием ПЭ и без него).

Активность и утомление мускулатуры оценивали путем проведения ЭМГ, с помощью электромиографической системы Callibri Muscle Tracker. Основные характеристики используемого ЭМГ датчика представлены ниже (табл. 1).

Чтобы оценить физиологическое состояние участника и влияние на него экзоскелета в ходе моделирования трудовой деятельности, использовался многопараметрический монитор пациента (серия KN-601M), основные характеристики которого представлены ниже (табл. 2).

Таблица 1. Характеристики используемых датчиков ЭМГ [16]**Table 1.** Characteristics of the EMG sensors used [16]

Параметр	Значение
Анализ повторяющихся во времени движений	да
Описание движений набором параметров	A_{cp} , A_{max} , T_{cp} , v , S
Анализ ритмичности повторений и изменения мощности движений во время активности	Да
Расчёт интегральной ЭМГ	Да
Конфигурация каналов с возможностью выбора места наложения	Да
Мониторинг мгновенного значения ЧСС с построением истории изменения этого показателя	Да
Автоматическая система обнаружения участков активности ЭМГ	Да
Количество одновременно используемых датчиков	До 4
Тип регистрации потенциалов	Биполярный
Беспроводной интерфейс связи	Да
Регистрируемые сигналы	ЭМГ
Диапазон измеряемых напряжений ЭМГ	0–2,4 В
Дальность работы канала беспроводной связи	до 2–5 м
Частота работы	2,4 ГГц
Установка	Самоклеющиеся электроды

Таблица 2. Характеристики используемого монитора пациента**Table 2.** Characteristics of the patient monitor used

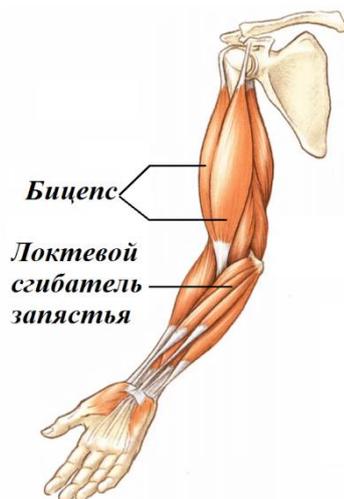
Параметр	Значение
Режимы работы	Мониторинг, измерение, диагностика
Отображаемые параметры	ЭКГ (2 канала)
	NIBP
	ЧСС
	ЧД
	SpO ₂ (сатурация)
	Температура тела
	Плетизмограмма
Респираграмма	
Фиксация графиков на экране	Да

Примечание. Составлено на основании следующих данных: Colposcopes, video colposcopes, UVB lamps, excimer lasers, photodynamic devices, ets. URL: <https://kernel.nt-rt.ru/> (дата обращения: 25.09.2024).

Также были задействованы хронометрическое устройство для соблюдения таймингов выполнения работы,

камера для регистрации хода выполнения экспериментов и средства обработки полученных данных.

При исследовании физиологической эффективности ПЭ оценивали состояние мышц спины в плечевом отделе (бицепс и локтевой сгибатель запястья на обеих руках) (рис. 3, а) для четырёх состояний участника (рис. 4).



а



б

Рис. 3. Схема расположения датчиков регистрации активности мышц: а – расположение и крепление широчайших мышц; б – расположение датчиков на участнике (левая сторона): 1 – область установки датчика на бицепс; 2 – область установки датчика

Fig. 3. The layout of the sensors for registering muscle activity: а – the location and attachment of the widest muscles; б – the location of the sensors on the volunteer (left side): 1 – the area of installation of the sensor on the biceps; 2 – the area of installation of the sensor on the elbow flexors of the wrist

Область данного расположения датчиков обусловлена тем, что при выполнении любой работы по перемещению груза верхние конечности (бицепс и локтевой сгибатель запястья) всегда задействованы и принимают на себя большую нагрузку [17]. Также важно принимать во внимание то, что во время работы верхними конечностями происходит вовлечение вторичных мышц рук, плечевого и грудного отделов [17], которые работают вместе, и при нарушении работы исследуемых мышц большая часть нагрузки перейдёт на вторичные, которые вследствие этого могут быть

перегружены как результат «эффект домино».

Также стоит учитывать, что даже парные мышцы человека (исследуемые мышцы) имеют незначительную асимметрию. Так, например, у правши сильнее развиты мышцы на правой руке. Симметричные мышцы также имеют различную степень активности вследствие многих факторов, как внутренних, так и внешних, которые оказывают воздействие на человека в течение жизни [18]. Исходя из этого полученные для каждой стороны результаты следует усреднять, принимая, что активность

мышц идентична, поскольку задача состоит в том, чтобы определить активность мышечной пары, а не выявлять существующую асимметрию между ними, которая является нормой (в индивидуальных случаях отклонение в 8–18%) при незначительных отклонениях в результате активности [18].

Исследование эффективности использования ПЭ было проведено в два этапа. На первом этапе моделировалась

трудовая деятельность без применения ПЭ, на втором этапе – с его использованием [1]. Каждый этап включал по 2 типа деятельности:

- перемещение груза весом 24 кг с одной поверхности на другую;
- удерживание груза весом 6 кг перед собой.

Рассмотрим схему экспериментов для моделирования трудовой деятельности (рис. 4).



Рис. 4. Схема моделирования трудовой деятельности

Fig. 4. Labor activity modeling schem

Перед началом тестирования участниками была выполнена 10-минутная разминка, состоящей из динамической растяжки как для верхней, так и для нижней части тела [19]. После установки

датчиков функциональной активности участникам было предложено выполнить два испытания для исследуемых мышц с целью последующей калибровки датчиков (Р 2.2.2006-05. Гигиена

труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда).

По разработанному плану эксперимента (ГОСТ Р. 11228-1-2009. Эргономика. Ручная обработка грузов. Поднятие и переноска. Общие требования) участникам нужно выполнить 15

подходов, включающих в себя перенос груза весом 24 кг ($0,33 \times 0,13 \times 0,1 \text{ м}^3$) со стола на стол на уровне 0,78 м от пола и на расстояние 1 м, а затем удержание груза весом 6 кг ($0,16 \times 0,06 \times 0,05 \text{ м}^3$) перед собой на вытянутых руках, 1,5–1,6 м над уровнем пола (рис. 5, а, б).

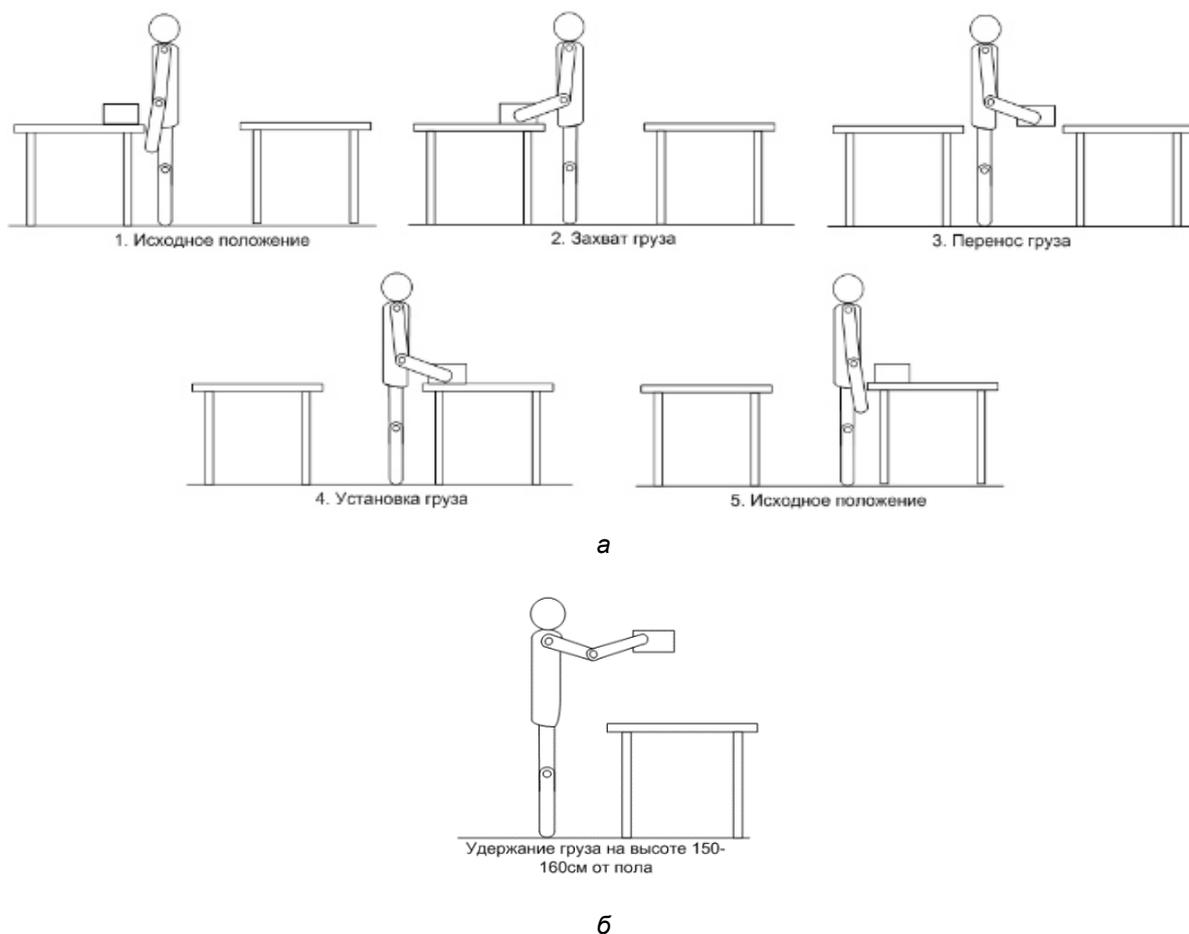


Рис. 5. Схемы выполнения работы: а – выполнение перемещения груза; б – удержание груза

Fig. 5. Schemes of work: а – execution of cargo movement; б – cargo retention

Каждое испытание начиналось со стандартизированной позы – вертикальная стойка, руки по швам, чтобы свести показания датчиков движения к нулю. Время переноса и соответственно 1-го подхода регулировалось следующим образом: 1 с – исходное положение; 2 с –

захват груза; начало подъёма; 3–5 с – перенос груза; 6 с – опускание груза; 7 с – исходное положение.

Порядка 5 с отдыха давалось между подходами переноса груза, порядка 1–1,5 ч – между типами работ, от 5 ч – между испытаниями без ПЭ и с ним.

Тип работ по удержанию груза проводился также с целью оценивающий продолжительность комфортной работы (на усталость) без применения ПЭ и с его применением. Эксперимент проводился в правильном положении поясницы, чтобы избежать неправильного распределения нагрузки. Руки при этом были выставлены перед собой на уровне плеч, в локте немного согнуты, образуя тупой угол $160 \pm 10^\circ$ (ГОСТ Р. 11228-1-2009. Эргономика. Ручная обработка грузов. Поднятие и переноска. Общие требования). В рамках данного эксперимента участники

удерживали груз комфортную по самоощущению продолжительность времени.

Результаты и их обсуждение

Результаты проведенного исследования с использованием упомянутых ранее методов выявили существенные различия между показателями участников, выполняющих задания без ПЭ и с его использованием. На рисунке 6 графически представлены результаты активности бицепса в моделируемой деятельности одного подхода переноса груза по амплитудным значениям сигналов мышц.

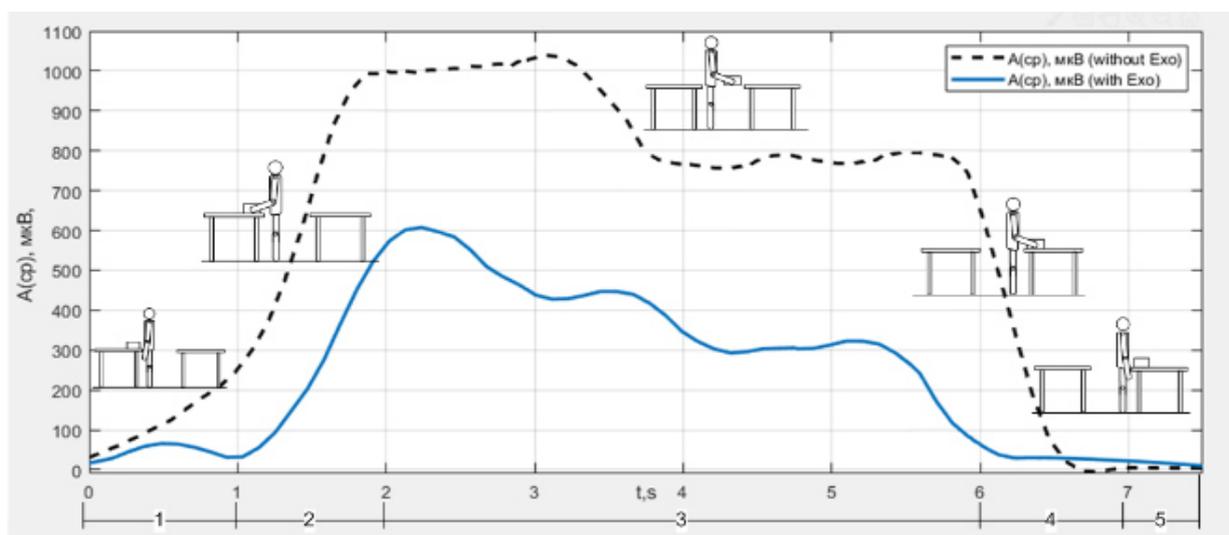


Рис. 6. Графики усреднённой активности бицепса во время выполнения одного подхода переноса груза для испытаний без использования ПЭ и с его использованием: 1 – исходное положение; 2 – захват груза – начало подъёма; 3 – перенос груза; 4 – установка груза; 5 – исходное положение

Fig. 6. Graphs of the average biceps activity during a single nose lift approach cargo for testing without the use of PE and with its use: 1 – initial position; 2 – cargo capture – the beginning of lifting; 3 – cargo transfer; 4 – cargo installation; 5 – starting position

Анализируя данные (рис. 6), можно отметить, что при выполнении первого подхода, включающего одноразовое перемещение груза, активность мышц заметно уменьшалась при использовании ПЭ, что снижает потенциальные риски, связанные с воздействием на человека нагрузок во время работы.

На рисунке 7 графически представлены результаты активности лучевого сгибателя запястья в моделируемой деятельности одного подхода переноса груза по амплитудным значениям сигналов мышц.

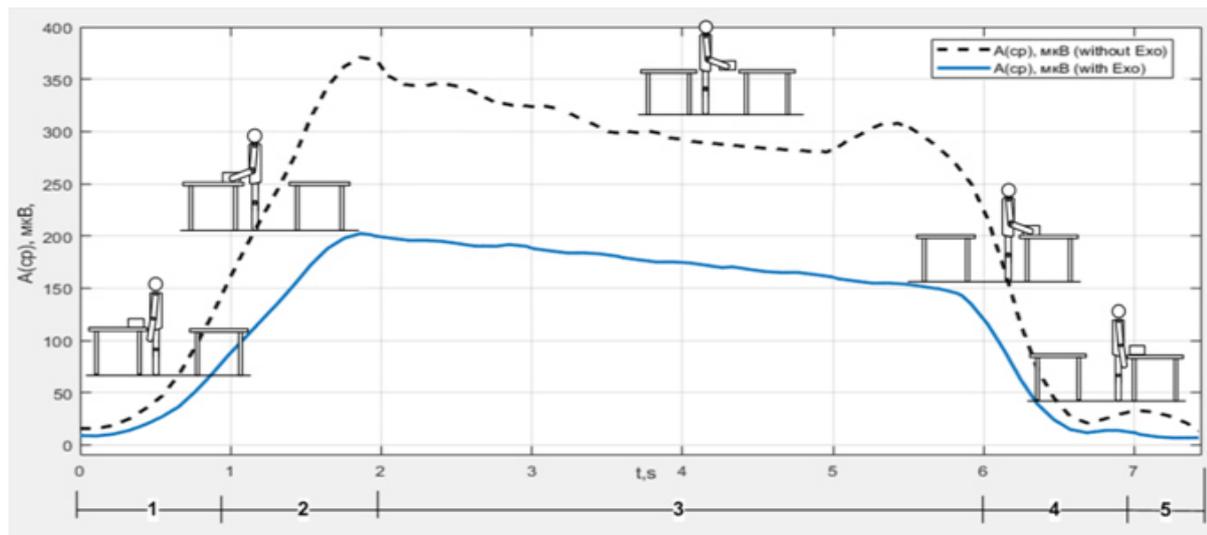


Рис. 7. Графики усреднённой активности лучевого сгибателя запястья во время выполнения одного подхода переноса груза для испытаний без использования ПЭ и с его использованием: 1 – исходное положение; 2 – захват груза – начало подъёма; 3 – перенос груза; 4 – установка груза; 5 – исходное положение

Fig. 7. Graphs of the average activity of the radial flexor of the wrist during the exercise one approach of cargo transfer for testing without the use of PE and with its use: 1 – starting position; 2 – cargo capture – the beginning of lifting; 3 – cargo transfer; 4 – load installation; 5 – starting position

На основании данных (рис. 7) видно, что при выполнении одного подхода, который включает одноразовое перемещение груза, активность исследуемых мышц существенно снижается при использовании ПЭ.

По полученным данным (рис. 6–7) очевидно, что человеку требуется

прикладывать меньше усилий для переноса груза при использовании ПЭ. Данные, представленные на рисунке 8, показывают среднее значение снижения мышечной активности локтевого сгибателя запястья при переносе и удержании груза без использования ПЭ и с его применением.

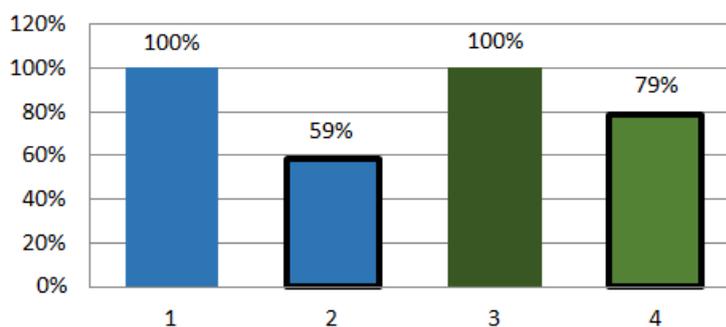


Рис. 8. Процентное отношение мышечной активности при переносе груза с использованием экзоскелета и без него: 1 – локтевой сгибатель запястья при переносе груза без экзоскелета; 2 – локтевой сгибатель запястья при переносе груза в экзоскелете; 3 – бицепс при переносе груза без экзоскелета; 4 – бицепс при переносе груза в экзоскелете

Fig. 8. Percentage of muscle activity when carrying cargo with and without an exoskeleton: 1 – is the elbow flexor of the wrist when carrying cargo without an exoskeleton; 2 – is the elbow flexor of the wrist when carrying cargo in an exoskeleton; 3 – is the biceps when carrying cargo without an exoskeleton; 4 – is the biceps when carrying cargo in an exoskeleton

Данные, представленные на рисунке 9, показывают среднее значение снижения мышечной активности

бицепса при переносе и удержании груза без использования ПЭ и с его применением.

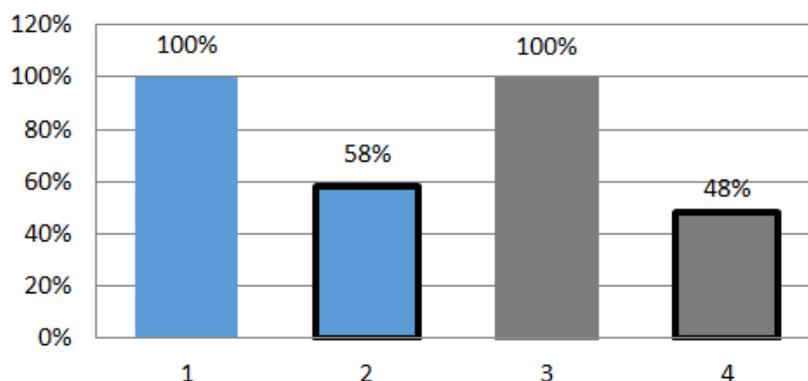


Рис. 9. Процентное отношение мышечной активности при удержании груза с использованием экзоскелета и без него: 1 – локтевой сгибатель запястья при удержании груза без экзоскелета; 2 – локтевой сгибатель запястья при удержании груза в экзоскелете; 3 – бицепс при удержании груза без экзоскелета; 4 – бицепс при удержании груза в экзоскелете

Fig. 9. Percentage of muscle activity when holding a load with and without an exoskeleton: 1 – elbow flexor of the wrist when holding a load without an exoskeleton; 2 – elbow flexor of the wrist when holding a load in an exoskeleton; 3 – biceps when holding a load without an exoskeleton; 4 – biceps when holding a load in an exoskeleton

Анализируя полученные данные (рис. 8–9) были получены следующие результаты: во время переноса груза активность локтевого сгибателя запястья при использовании ПЭ снижалась в среднем на 41%, бицепса – на 21%; во время удержания груза активность локтевого сгибателя запястья при использовании ПЭ снижалась в среднем на 42%, бицепса – на 52%.

По результатам замеров основных физиологических показателей получились следующие усреднённые результаты, подтверждающие эффективность применения ПЭ:

- после эксперимента с использованием ПЭ насыщенность крови кислородом (сатурация) снижалась на 1,5% по сравнению с состоянием покоя, тогда как после эксперимента без ПЭ она падала на 3%;

- давление после эксперимента с применением ПЭ повышалось на 1–7 единиц относительно значений в покое, в то время как без использования ПЭ оно возрастало на 10–12 единиц по сравнению со значениями в покое;

- частота сердечных сокращений после проведения эксперимента при использовании ПЭ увеличивалась на 1–3/1–9 единиц в сравнении со значениями в состоянии покоя, в то время как без использования ПЭ увеличивалась на 6–7/4–12 в сравнении с состоянием покоя.

Не менее важны результаты эксперимента, оценивающего продолжительность комфортной работы без применения ПЭ и с его применением, поскольку зачастую во время работы с грузом человек не соблюдает установленные временные отрезки для снижения утомляемости, которые прописываются в

различных методиках и инструкциях по охране труда. Полученные результаты показали, что в экзоскелете продолжительность удержания груза в среднем составляла 4 мин 50 с. Без использования экзоскелета этот показатель составил лишь 1 мин 55 с.

Анализируя полученные результаты, имеем, что на 52–42% снижается активность мышц, что положительно влияет продолжительность комфортной работы в ПЭ (рис. 8–9). Также результаты показали, что в среднем в 2,5 раза увеличилась продолжительность комфортной работы в ПЭ. По словам участников, с ПЭ легче выполнять работу, и ощущение усталости наступает позже.

Интервьюирование участников по специальным вопросам для случаев с использованием ПЭ дало следующие результаты:

- оценка комфорта и скорости надевания / снятия ПЭ показала, что затруднения возникали в первые несколько раз надевания / снятия;

- оценка скорости привыкания к использованию ПЭ показала, что требуется порядка 3–5 ч для привыкания и комфортной работы;

- оценка удобства использования ПЭ во время отдыха или выполнения операций, отличных от рабочих, показала, что после истечения срока привыкания к использованию экзоскелета ощущался как верхняя одежда и не приносил дискомфорта, за исключением случаев, когда первоначально участникам недовольно было оценено удобство расположения на нём ПЭ, что в дальнейшем привело к дискомфорту, для устранения которого требовалась индивидуальная дополнительная регулировка, после которой жалобы исчезали.

Согласно ответам участников, все замечали небольшую разницу в пользу использования ПЭ. Особенно заметна помощь ПЭ после ряда выполненных подходов.

Также была определена рабочая зона при работе в экзоскелете (рис. 10) для оценивания комфортности работы в ПЭ.

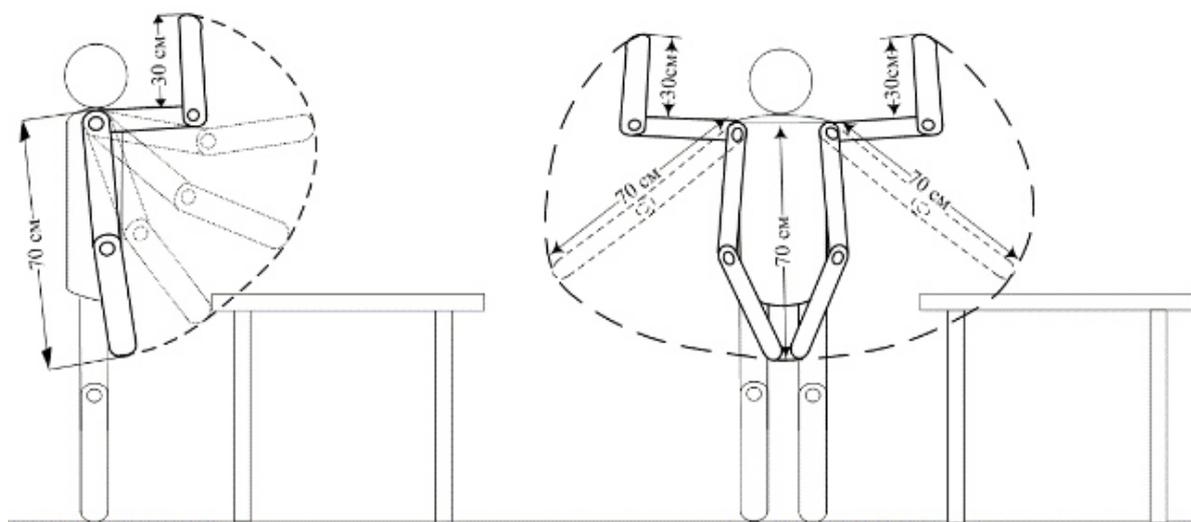


Рис. 10. Рабочая зона при работе в экзоскелете

Fig. 10. Working area when working in an exoskeleton

По полученным данным имеем, что экзоскелет незначительно сковывает движения. Так поднять руки вверх можно только в согнутых локтях. Данное ограничение в передвижении рук над головой обусловлено геометрическими особенностями тестируемого устройства.

Выводы

Современные подходы по определению функционального состояния человека, в т. ч. и во время трудовой деятельности, сопряжённой со стереотипными движениями, включающие измерение основных биологических показателей, «захват движений» и использование электромиографии, позволяют проводить объективную физиологическую оценку эффективности и, что немало важно, безопасности применения ПЭ в лабораторных условиях.

Результаты настоящего исследования с использованием вышеперечисленных методов, которые могут дополнить имеющиеся подходы к исследованию функционального состояния работников физического труда, подтвердили эффективность и безопасность применения тестируемого ПЭ в условиях работы с грузом, а также минимизацию рисков,

возникающих в результате стереотипных движений в поясничном отделе.

Стоит отметить, что во время работы с грузом часть стереотипных и рабочих движений, возникающих при локальной нагрузке (с участием мышц кистей и пальцев рук), не могут быть нивелированы применением тестируемого ПЭ, а при региональной нагрузке (при работе с преимущественным участием мышц рук и плечевого пояса) уже могут быть нивелированы.

По полученным результатам данного исследования можно сделать вывод, что тестируемый образец ПЭ, насколько смогли оценить, является эффективным и безопасным.

Однако выводы о безусловной безопасности и высокой эффективности применения данной модели ПЭ на рабочих местах в реальных условиях следует делать индивидуально. При этом рекомендуется учитывать результаты данной проведенной работы, особенности конкретного производства, включая наличие вредных и / или опасных факторов, точные характеристики технологических процессов, нюансы производственных операций и используемое оборудование.

Список литературы

1. Yatsun A., Shcherbakova M., Malchikov A. Experimental studies of a soft industrial exoskeleton in work-related activity for the evaluation of its operational efficiency // E3S Web of Conferences. 2024. N 474. P. 01031.

2. The Effect of a Wearable Assistive Trunk Exoskeleton on the Motor Coordination of People with Cerebellar Ataxia / A. Tatarelli [et al.] // *Applied Sciences*. 2024. N 14(15). P. 6537.

3. Современные методы исследования безопасности и физиологической эффективности применения промышленных экзоскелетов / А. М. Герегей [и др.] // *Анализ риска здоровью*. 2020. № 3. С. 148–159.

4. Куприна Н. И., Севрюков В. В. Профессиональные полиневропатии верхних конечностей от физических перегрузок // *Известия российской военно-медицинской академии*. 2020. Т. 39, № S2. С. 142–143.

5. Актуальность использования промышленных экзоскелетов для снижения количества профессиональных заболеваний опорно-двигательного аппарата верхней части тела / И. А. Орлов [и др.] // *Медицина труда и промышленная экология*. 2019. Т. 59, № 7. С. 412–416.

6. Самонкина М. Е. Влияние здоровья населения на экономику в РФ // *Актуальные проблемы общества, экономики и права в контексте глобальных вызовов: сборник статей Международной научно-практической конференции / Международный центр научного партнерства «Новая Наука»*. Петрозаводск, 2023. С. 43–48.

7. Экзоскелеты – это новая необходимость. Почему российской промышленности придется их использовать? URL: <https://vc.ru/tech/273882-ekzoskelety-eto-novaya-neobhodimost-pochemu-rossiyskoy-promyshlennosti-pridetsya-ih-ispolzovat> (дата обращения: 26.09.2024).

8. Ванюшин Ю. С., Хайруллин Р. Р. Кардиореспираторная система как индикатор функционального состояния организма спортсменов // *Теория и практика физической культуры*. 2015. № 7. С. 11–14.

9. Objective and Subjective Effects of a Passive Exoskeleton on Overhead Work // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2020. Vol. 28(1). P. 152–164. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2019.2945368>

10. Ланская О. В., Ланская Е. В. Электромиографическое исследование активности мышц у студентов физкультурного вуза, специализирующихся в различных видах спорта // *Новые исследования*. 2017. № 1 (50). С. 50–64.

11. The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work / T. Bosch, J. Eck, K. Knitel, M. Looze // *Applied Ergonomics*. 2016. N 54. P. 212–217. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.12.003>

12. Industrial Wearable Exoskeletons and Exosuits Assessment Process / J. Masood, A. Dacal-Nieto, V. Alonso-Ramos, M. I. Fontano, A. Voilqué, J. Bou // *Wearable Robotics:*

Challenges and Trends: Conference paper. Springer, 2018. P. 234–238. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01887-0_45

13. Яцун А. С., Никулин Я. С., Логунов Е. Р. Опыт внедрения промышленных экзоскелетных систем на предприятиях пищевой промышленности // Завалишинские чтения 23: сборник докладов XVIII Международной конференции по электромеханике и робототехнике / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. СПб., 2023. С. 149–154.

14. Экзоскелеты: анализ конструкций, классификации, принципы создания, основы моделирования / С. Ф. Яцун, В. Е. Павловский, Б. В. Лушников, О. В. Емельянова, А. С. Яцун, С. И. Савин, А. В. Ворочаев. Курск: Университетская книга, 2014. 148 с.

15. Экзоскелеты: анализ конструкций, классификации, принципы создания, основы моделирования / С. Ф. Яцун [и др.]. Курск: Университетская книга, 2015. 179 с.

16. Callibri Muscle Tracker. URL: <https://callibri.com/ru/callibri-muscle-tracker> (дата обращения: 05.09.2024).

17. Гайворонский И. Нормальная анатомия человека. СПб.: Спецлит, 2022. Т. 1. С. 212–286.

18. Функциональная асимметрия как биологический феномен сопутствующий спортивному результату / С. С. Худик, А. И. Чикуров, А. Л. Войнич, С. В. Радаева // Вестник Томского государственного университета. 2017. № 421. С. 193–202.

19. Технические приемы и рабочие методы подъема и перемещения тяжестей. URL: <https://labor-safety.org/blog/> (дата обращения: 25.09.2024).

Reference

1. Yatsun A., Shcherbakova M., Malchikov A. Experimental studies of a soft industrial exoskeleton in work-related activity for the evaluation of its operational efficiency. *E3S Web of Conferences*. 2024;(474):01031.

2. Tatarelli A., et al. The Effect of a Wearable Assistive Trunk Exoskeleton on the Motor Coordination of People with Cerebellar Ataxia. *Applied Sciences*. 2024;(14):6537.

3. Geregey A.M., et al. Modern research methods for the safety and physiological effectiveness of industrial exoskeletons. *Analiz riska zdorov'yu = Health Risk Analysis*. 2020;(3):148–159. (In Russ.)

4. Kuprina N.I., Sevryukov V.V. Professional polyneuropathies of the upper extremities from physical overloads. *Izvestiya rossiiskoi voenno-meditsinskoj akademii = Proceedings of the Russian Military Medical Academy*. 2020;39(S2):142–143. (In Russ.)

5. Orlov I.A., et al. The relevance of using industrial exoskeletons to reduce the number of occupational diseases of the musculoskeletal system of the upper body. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya = Occupational Medicine and Industrial Ecology*. 2019;59(7):412–416. (In Russ.)

6. Samonkina M.E. The impact of public health on the economy in the Russian Federation. In: *Aktual'nye problemy obshchestva, ekonomiki i prava v kontekste global'nykh vyzovov: sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Actual problems of society, economics and law in the context of global challenges: Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference*. Petrozavodsk: Mezhdunarodnyi tsentr nauchnogo partnerstva "Novaya Nauka"; 2023. P. 43–48. (In Russ.)

7. Exoskeletons are a new necessity. Why would Russian industry have to use them? Available at: <https://vc.ru/tech/273882-ekzoskelety-eto-novaya-neobhodimost-pochemu-rossiyskoy-promyshlennosti-pridetsya-ih-ispolzovat> (accessed 26.09.2024).

8. Vanyushin Yu.S., Khairullin R. R. Cardiorespiratory system as an indicator of the functional state of the athletes' body. *Teoriya i praktika fizicheskoi kul'tury = Theory and Practice of Physical Culture*. 2015;(7):11–14. (In Russ.)

9. Objective and Subjective Effects of a Passive Exoskeleton on Overhead Work. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2020;28(1):152–164. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2019.2945368>

10. Lanskaya O.V., Lanskaya E.V. Electromyographic study of muscle activity in students of a physical education university specializing in various sports. *Novye issledovaniya = New Research*. 2017;(1):50–64. (In Russ.)

11. Bosch T., Eck J., Knitel K., Looze M. The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied Ergonomics*. 2016;(54):212–217. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.12.003>

12. Masood J., Dacal-Nieto A., Alonso-Ramos V., Fontano M.I., Voilqué A., Bou J. Industrial Wearable Exoskeletons and Exosuits Assessment Process. In: *Wearable Robotics: Challenges and Trends: Conference paper*. Springer; 2018. P. 234–238. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01887-0_45

13. Yatsun A.S., Nikulin Ya.S., Logunov E.R. The experience of implementing industrial skeleton systems in food industry enterprises. In: *Zavalishinskie chteniya 23: sbornik dokladov XVIII Mezhdunarodnoi konferentsii po elektromekhanike i robototekhnike = Zavalishinsky readings 23: Collection of reports of the XVIII International Conference on Electromechanics*

and Robotics. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2023. P. 149–154. (In Russ.)

14. Yatsun S.F., Pavlovsky V.E., Lushnikov B.V., Yemelyanova O.V., Yatsun A.S., Savin S.I., Vorochaev A.V. Exoskeletons: design analysis, classifications, principles of creation, principles of modeling. Kursk: Universitetskaya kniga; 2014. 148 p. (In Russ.)

15. Yatsun S.F., et al. Exoskeletons: analysis of structures, classifications, principles of creation, principles of modeling. Kursk: Universitetskaya kniga; 2015. 179 p. (In Russ.)

16. Callibri Muscle Tracker. Available at: <https://callibri.com/ru/callibri-muscle-tracker> (accessed 05.09.2024).

17. Gaivoronsky I. Normal human anatomy. Vol. 1. Sankt-Peterburg: Speclit; 2022. P. 212–286. (In Russ.)

18. Khudik S.S., Chikurov A.I., Voynich A.L., Radaeva S.V. Functional asymmetry as a biological phenomenon accompanying athletic performance. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Tomsk State University*. 2017;(421):193–202. (In Russ.)

19. Technical techniques and working methods of lifting and moving weights. (In Russ.) Available at: <https://labor-safety.org/blog/> (accessed 25.09.2024).

Информация об авторах / Information about the Authors

Яцун Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ayatsun@ya.ru, Researcher ID: N-6212-2016, ORCID: 0000-0002-9336-7295

Щербакова Мария Петровна, преподаватель кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: 5-storm-7@mail.ru, ORCID: 0009-0006-6472-5862

Andrey S. Yatsun, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ayatsun@ya.ru, Researcher ID: N-6212-2016, ORCID: 0000-0002-9336-7295

Maria P. Shcherbakova, Lecturer of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: 5-storm-7@mail.ru, ORCID: 0009-0006-6472-5862

Мальчиков Андрей Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zveroknnp@gmail.com, Researcher ID: N-8856-2016, ORCID: 0000-0003-2902-1721

Andrei V. Malchikov, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zveroknnp@gmail.com, Researcher ID: N-8856-2016, ORCID: 0000-0003-2902-1721

Синтез технологий виртуальной реальности и компьютерного зрения в симуляторе промышленной радиографии

В. Д. Корчагин¹ ✉, В. С. Кувшинников², Е. Е. Ковшов²

¹ Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева
Миусская пл., д. 9/1, г. Москва 125047, Российская Федерация

² Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажной технологии – Атомстрой
Алтуфьевское ш., д. 43/2, г. Москва 127410, Российская Федерация

✉ e-mail: vladia58@mail.ru

Резюме

Цель исследования. В настоящее время цифровизация производства рассматривается как важнейший аспект технологического роста для повышения конкурентоспособности предприятий. Предложен инновационный подход, объединяющий технологии виртуальной реальности и компьютерного зрения в единый инструмент, призванный совершенствовать качество практико-ориентированного обучения в сфере промышленной радиографии. В рамках статьи проведено исследование эффективных моделей искусственных нейронных сетей в приложении к задаче детекции дефектных участков сварных соединений металла на радиографических изображениях. Проведен детальный анализ архитектуры YOLOv8 в отношении обнаружения мелкоразмерных дефектов. Описан метод синтеза технологий виртуальной реальности и компьютерного зрения в едином образовательном инструменте промышленной радиографии.

Методы. В работе использовались методы эмпирического исследования, системного анализа и синтеза смежных информационных технологий.

Результаты. В результате эмпирического исследования была выявлена ограниченная эффективность модели YOLOv10 применительно к обобщению признаков объектов малой размерности и низкой контрастности. YOLOv8 показала более практико-применимые результаты и большую стабильность при обобщении контурной составляющей дефектов. В процессе системного анализа архитектуры YOLOv8 была выявлена потеря пространственной информации при использовании последовательных сверточных операций, предшествующих повышающей дискретизации. Выполнена модификация базовой архитектуры YOLOv8 с целью улучшения обобщающей способности дефектов малой размерности и низкой контрастности. Представлена методика синтеза технологий виртуальной реальности и компьютерного зрения в форме интеллектуального ассистента для интеллектуализации процесса неразрушающего контроля.

Заключение. Интеграция вышеописанного метода синтеза в единый программный продукт позволит повысить качество подготовки специалистов и открыть доступ к инновационным методам совершенствования профессиональных навыков на каждом этапе профессиональной карьеры.

Ключевые слова: виртуальная реальность; цифровые и информационные технологии; компьютерное зрение; программный симулятор; рентгеновское изображение.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Для цитирования: Корчагин В. Д., Кувшинников В. С., Ковшов Е. Е. Синтез технологий виртуальной реальности и компьютерного зрения в симуляторе промышленной радиографии // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 4. С. 98–115. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-14-4-98-115>

Поступила в редакцию 14.10.2024

Подписана в печать 12.11.2024

Опубликована 27.09.2024

Synthesis of virtual reality and computer vision technologies in industrial radiography simulator

Valerii D. Korchagin¹ ✉, Vladimir S. Kuvshinnikov², Evgeny E. Kovshov²

¹ Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
9/1 Miusskaya sq., Moscow 125047, Russian Federation

² Joint Stock Company Research and Design Institute of Installation Technology – Atomstroy
43/2 Altufievskoe highway, Moscow 127410, Russian Federation

✉ e-mail: valerak249@gmail.com

Abstract

Purpose of research. Nowadays, the digitalization of production is considered as the most important aspect of technological growth to improve the competitiveness of enterprises. An innovative approach combining virtual reality and computer vision technologies into a single tool designed to improve the quality of practice-oriented training in the field of industrial radiography is proposed. Within the framework of the article the research of the most effective models of artificial neural networks in application to the task of detection of defective areas of welded metal joints on radiographic images is carried out. A detailed analysis of the YOLOv8 architecture with respect to the detection of small-sized defects is carried out. A method for synthesizing virtual reality and computer vision technologies in a single educational tool for industrial radiography is described.

Methods. Methods of empirical research, system analysis and synthesis of related information technologies were used in this work.

Results. The empirical study revealed the limited effectiveness of the YOLOv10 model as applied to the generalization of features of objects of small dimensionality and low contrast. YOLOv8 showed more practical results and greater stability when generalizing the contour component of defects. In the process of system analysis of YOLOv8 architecture the loss of spatial information when using sequential convolutional operations preceding upsampling was revealed. Modification of the basic YOLOv8 architecture was performed in order to improve the generalization ability of low-dimensional and low-contrast defects. The methodology of synthesis of virtual reality and computer vision technologies in the form of an intelligent assistant for intellectualization of nondestructive testing process is presented.

Conclusion. The integration of the above synthesis method into a single software product will improve the quality of specialist training and open access to innovative methods of improving professional skills at every stage of a professional career.

Keywords: virtual reality; digital and information technologies; computer vision; x-ray image; software simulator.

Conflict of interest: The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

For citation: Korchagin V.D., Kuvshinnikov V.S., Kovshov E.E. Synthesis of virtual reality and computer vision technologies in industrial radiography simulator. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2024;14(4):98–115. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-98-115>

Received 14.10.2024

Accepted 12.11.2024

Published 27.09.2024

Введение

В последние годы наблюдается стремительный рост интереса к развитию и внедрению технологий компьютерного зрения (CV) [1] и виртуальной реальности (VR) в различных сферах человеческой деятельности [2]. О данном факте свидетельствует увеличение за последние годы числа публикаций [3], посвященных исследованию данной области научно-практических знаний в изданиях, индексируемых в наукометрических базах данных [4]. На примере мировой практики видно, что интеграция современных информационных технологий (IT) в образовательный процесс [5] становится актуальным и востребованным подходом, который позволяет организациям повысить конкурентоспособность независимо от направления основной деятельности [6]. Многообразие подходов и возможностей, доступных при цифровизации образования [7], значительно расширяет спектр решаемых образовательных задач и способствует более качественному усвоению материала за счет углубления практико-ориентированной составляющей учебных программ.

VR-технологии открывают двери в мир интерактивных симуляций для проведения опасных или дорогостоящих

экспериментов, предоставляя возможность использования цифровых двойников вместо труднодоступного оборудования. Виртуальные лаборатории предлагают приближенный к реальному опыт взаимодействия с объектом исследования, позволяют проводить эксперименты и совершать ошибки без риска порчи ценного оборудования, потери дорогостоящих материалов или получения производственных травм. Безопасный первичный опыт в интерактивной форме и с обратной связью незаменим в обучении военным профессиям, техническим специальностям, сопряженным с работой на опасных объектах, в освоении как новых медицинских манипуляций, так и ранее изученных при условии внешних ограничений или с новым оборудованием. Более того, для многих применение VR становится катализатором активного обучения и мотивации: студенты, погруженные в виртуальное пространство, проявляют живой интерес к материалу, что содействует более глубокому усвоению знаний [8]. Например, виртуальные экскурсии по историческим памятникам и научным лабораториям делают образовательный процесс увлекательным и насыщенным.

В свою очередь, CV-технологии неразрывно связаны с искусственными

нейронными сетями (ИНС), являющимися одним из самых востребованных направлений исследований на сегодняшний день. Одной из ключевых задач CV является обработка и анализ визуальной информации, что способствует автоматизации ряда процессов, от распознавания лиц до идентификации объектов на изображениях и видео. Интеллектуальные системы, основанные на методах глубокого обучения, становятся основой для решения этих задач, обеспечивая высокую точность и скорость обработки данных. Они способны обучаться на больших объемах информации, выявляя скрытые признаки и закономерности, а также выполняя классификацию данных, что, в свою очередь, способствует улучшению качества процесса принятия решений [9]. Современные CV-приложения охватывают широкий спектр областей: от медицины, где ИНС способствуют диагностике заболеваний на основе медицинских изображений, до автономных транспортных средств, способных распознавать дорожные знаки, пешеходов и различные объекты на снимках местности.

Таким образом, существует потенциал для синтеза VR- и CV-технологий в программах профессиональной подготовки и переподготовки технических специалистов, работающих в сферах, сопряженных с высокой степенью риска и строгими требованиями к профессиональным компетенциям.

Неразрушающий контроль (НК) занимает ключевую роль в современном промышленном комплексе. На фоне роста требований к повышению качества материалов, увеличения объемов производства и модернизации технологий НК в рамках концепции NDT 4.0 [10] совершенствование программ профессиональной подготовки с помощью информационных технологий становится насущной задачей, требующей сочетания высокого качества и гибкости в создании учебных методических и практических материалов [11]. На рисунке 1 представлены сцены применения виртуальной радиографической лаборатории в рамках конкурса профессионального мастерства.

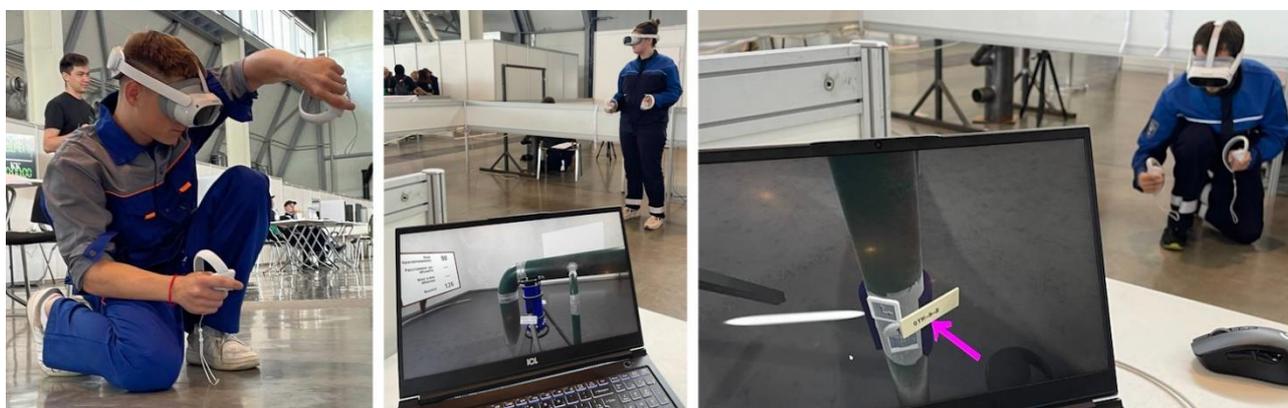


Рис. 1. Симулятор промышленной радиографии на конкурсе профессионального мастерства дефектоскопистов

Fig. 1. Simulator of industrial radiography at the professional skills competition for defectoscopists

В статье рассматривается метод синтеза VR- и CV-технологий в едином комплексном инструменте для подготовки специалистов по НК к практическим задачам в области промышленной радиографии. Описывается порядок взаимодействия студентов с виртуальным окружением и интеллектуальным цифровым ассистентом при симуляции контроля сварных соединений.

Материалы и методы

Сварка – это процесс получения неразъемных соединений материалов, который требует высокой технической и технологической точности. От качества сварного соединения напрямую зависят надежность и срок безотказной службы всего изделия. Контроль качества сварных соединений включает визуальный и измерительный анализ, ультразвуковую и рентгеновскую дефектоскопию, а также иные методы, позволяющие выявить критические недостатки соединений конструкции на ранних стадиях производства и эксплуатации. Низкое качество контроля сварных соединений может привести к значительным экономическим потерям вследствие простоев и ущерба, вызванных авариями, а также риску возникновения угрозы для жизни и здоровья людей.

Контроль сварных соединений является важным элементом в процессе сертификации и получения разрешительных документов для эксплуатации сооружений. Соблюдение международных норм и стандартов при контроле

сварных соединений упрощает компаниям выход на зарубежные рынки и повышает конкурентоспособность продукции. Высокий уровень подготовки специалистов по НК помогает гарантировать соответствие производимых изделий установленным стандартам качества, что особенно актуально в строительстве, кораблестроении, самолетостроении, ракетостроении, тяжелом машиностроении, в энергетической и транспортной отраслях. Таким образом, организация комплекса мер по управлению старением и отслеживанию жизненного цикла изделий, включающего плановый контроль сварных соединений в установленном объеме, является необходимым условием поддержания высокого уровня безопасности, надежности и долговечности продукции в различных сферах промышленности.

Многие традиционно применяемые методы неразрушающего контроля [12] включают этап визуального представления данных, содержащих информацию о структурной целостности исследуемого объекта, для удобства расшифровки и анализа человеком. Специалист исследует полихроматическое растровое изображение с применением цифровых инструментов измерения качественных характеристик объекта для выявления участков, не соответствующих установленным нормам и требованиям нормативной документации. Процесс анализа результатов контроля требует от специалиста поддержания высокого уровня концентрации внимания. В силу

монотонности и повторяемости операций процедура расшифровки изображений является предпочтительной целью для исследований в области автоматизации и интеллектуализации с помощью современных ассистивных компьютерных технологий.

В качестве первого компонента синтеза выступает VR-симулятор [13], предназначенный для обучения специалистов в области промышленной радиографии. Симулятор содержит цифровую симуляцию радиографической лаборатории, цифровые двойники объектов контроля, оснастки и детекторов, объединенных в единую систему генерации реалистичных цифровых двойников

адиографических изображений с помощью программ-шейдеров. Такой подход предоставляет широкие интерактивные возможности для настройки параметров экспозиции, измерительного оборудования, контроля соблюдения правил безопасности и соответствия выполняемых диагностических процедур требованиям нормативно-технической документации.

Вторым компонентом синтеза является ИНС на базе авторской модификации архитектурной модели YOLO. Модификация направлена на повышение точности и сокращение вычислительной сложности инференса. Иллюстрации базовой архитектуры ИНС и авторской модификации представлены ниже (рис. 2, 3).

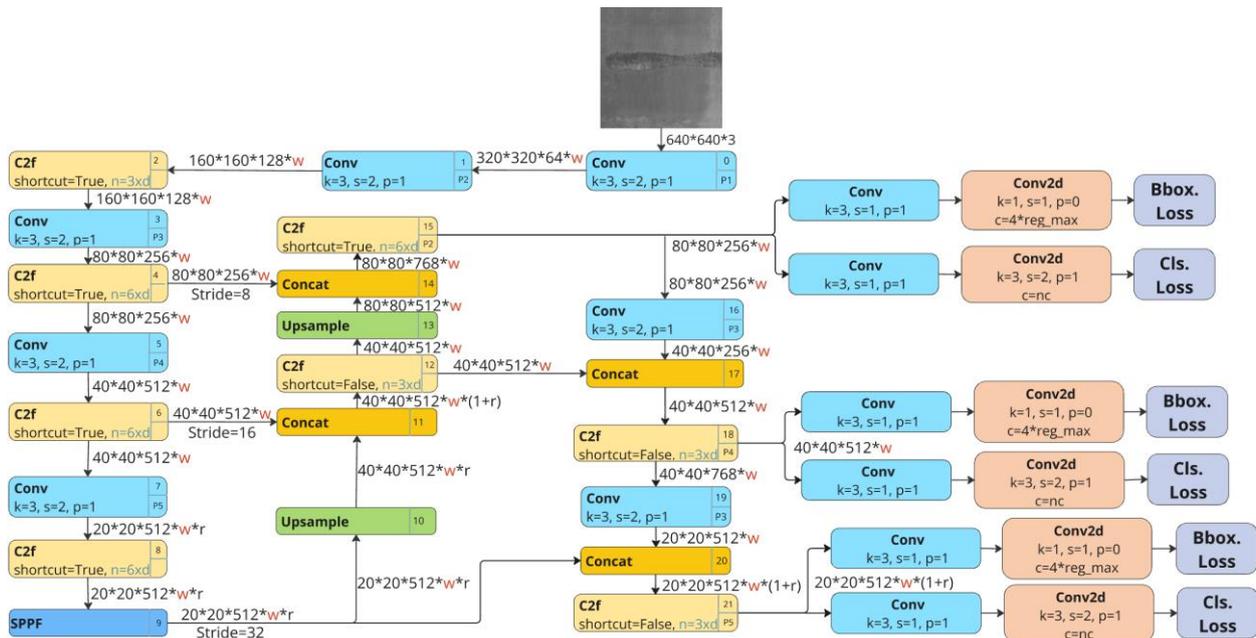


Рис. 2. Архитектура YOLOv8

Fig. 2. YOLOv8 architecture

В качестве опорной экспериментальной модели выбрана YOLOv8 [14]. Исследование показало, что ИНС данной архитектуры демонстрирует

наилучшие результаты в задаче детекции признаков малых объектов при слабой контрастности изображения, что является важным достоинством в

контексте анализа радиографических изображений. При подготовке к исследованию была составлена выборка из 2000 размеченных радиографических изображений сварных соединений с разнообразными видами дефектов. Для повышения сбалансированности и репрезентативности данных выполнена аугментация изображений, что позволило увеличить совокупный размер

обучающей выборки до 6000 экземпляров изображений. В связи с отсутствием общедоступных размеченных наборов данных (далее – датасет) с радиографическими изображениями объектов промышленного радиационного контроля, использовался фрагмент ранее собранного датасета [15], содержащего различные дефекты металлических поверхностей.

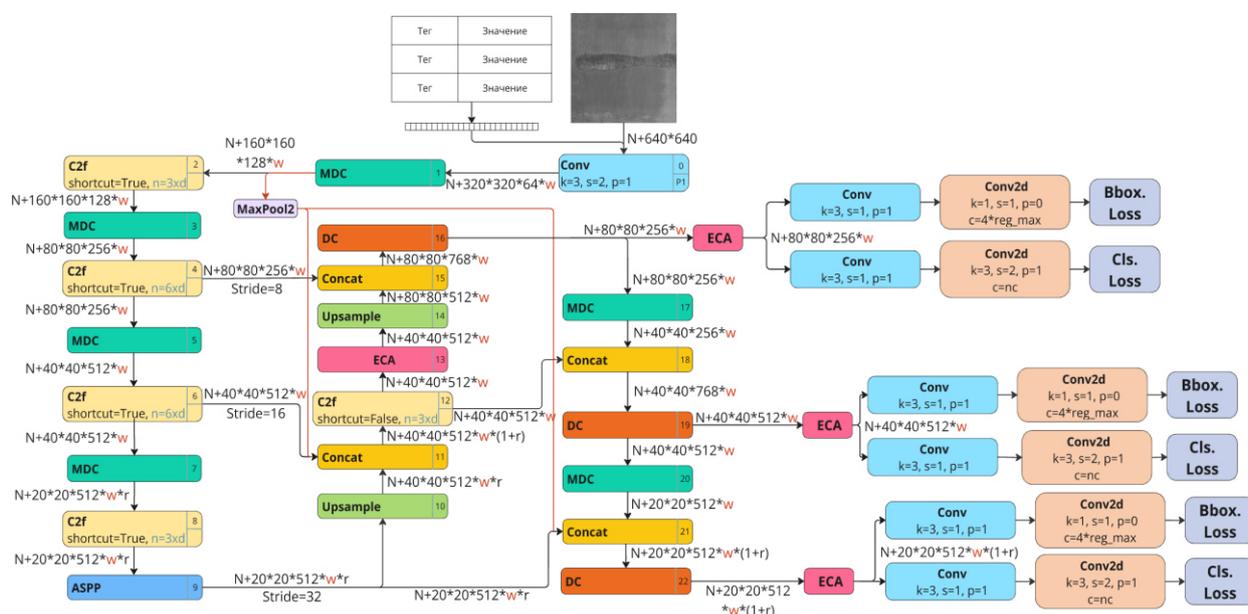


Рис. 3. Архитектура модифицированной версии YOLOv8

Fig. 3. Architecture of the modified version of YOLOv8

Сформированный набор изображений-примеров передаёт встречаемые на практике особенности радиографических изображений промышленных объектов контроля. Исследование проводилось с использованием моделей на основе архитектур YOLOv8 и самой современной на данный момент версии YOLOv10 [16]. Обучение проводилось в 100 эпох и включало применение модификаций Nano, Small и Medium. Как утверждают авторы YOLO [16], в 10-й

версии модели первостепенное внимание уделено производительности, а не качеству получаемых результатов. Однако практическое применение в области детекции изображений автомобильного транспорта позволило добиться удовлетворительных результатов. Таким образом, в совокупности с акцентом на быстродействии модель сохранила чувствительность и обобщающую способность. Из вышеприведенного следует, что исследование практической

эффективности 10-й версии модели в задаче детектирования дефектов является актуальным. Оценка эффективности моделей проводилась на основе набора инференсов, полученных на выходе обученных моделей ИНС при обработке изображений из тестовой выборки и из дополнительного набора изображений, класс которых не представлен в обучающей выборке. Применение изображений дополнительного класса обусловлено

необходимостью оценки способности модели к обобщению локальных признаков в условиях ненормированности и неполноты обучающей выборки применительно к реальным объектам НК. На рисунке 4 представлены несколько примеров экспериментальных инференсов: слева – результаты, полученные на тестовой выборке; справа – результаты, полученные на изображениях дополнительного класса.

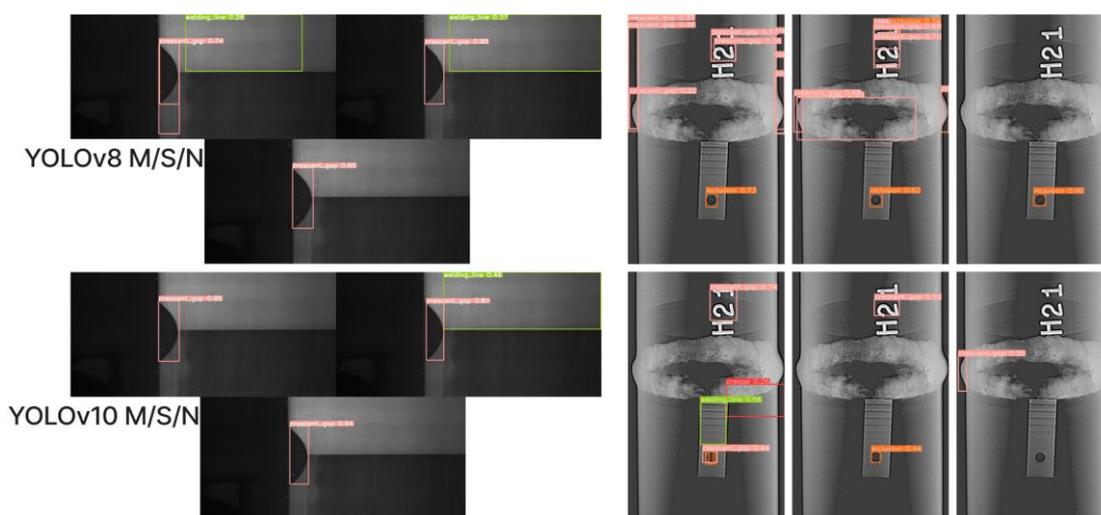


Рис 4. Примеры экспериментальных инференсов YOLOv8 и YOLOv10

Fig 4. Examples of experimental inferences of YOLOv8 and YOLOv10

Поскольку обе модели продемонстрировали весьма ограниченные способности к обобщению локальных признаков в пределах используемого датасета, использование традиционных методов на основе общепринятых метрик, таких как mAP, Precision и Recall, для сравнения – результатов работы моделей, не привело к статистически значимому выводу из-за высокой степени вариативности полученных оценок, и соответствующие диаграммы опущены. Для анализа итоговых показателей был

применен метод экспертной оценки. В ходе изучения экспериментальных инференсов моделей был сделан вывод о более низкой эффективности 10-й версии в контексте обобщения локальных признаков дефектов. При использовании 8-й версии как на изображениях тестовой выборки, так и на изображениях дополнительного класса контуры дефектов известных ИНС выявляются чаще, чем при использовании 10-й версии модели. Выявленная способность YOLOv8 к более эффективному извлечению локальных

признаков служит основанием для ее применения в качестве опорной модели при разработке модифицированной версии. На решение также повлияли результаты ранее выполненного исследования эффективности распространенных моделей в задаче обработки данных радиационного НК [17].

В ходе анализа отдельных элементов архитектуры YOLOv8 было установлено, что последовательные сверточные операции, сопровождающиеся повышающей дискретизацией (Upsampling), ведут к утрате значимой части пространственной информации, заключенной в верхних слоях базовой модели. Пространственные признаки описывают положение, структуру объектов, форму, размер и иные характеристики, определяющие расположение объектов относительно друг друга. Модель, предварительно обученная на выборке с примерами как крупных, так и мелких дефектов, демонстрирует высокую точность в классификации и локализации отчетливо выраженных дефектов, однако демонстрирует ограниченные способности в задаче выявления мелкогабаритных включений.

Для устранения описанной проблемы предлагается использовать несколько подходов, способных повысить практическую ценность модели:

- внедрение механизма эффективного канального внимания (ECA) [18], основанного на адаптивном сверточном ядре. Использование одномерного внимания вместо традиционной полной матрицы и глобального усреднения позволяет приоритизировать каналы

признаки. Канальными признаками называется информация, представленная в каналах данных, позволяющая выделять текстурные или цветовые признаки объекта. Канальное внимание способствует как увеличению точности распознавания, так и значительному сокращению вычислительных затрат [18];

- замена последовательности блоков сверточных операций на 2 вида блоков, различающихся наличием и отсутствием операции максимального объединения (MaxPool2D), а также состоящие из свертки с шагом 2 и разделяемой свертки по глубине (DC/MDC) [19];

- дополнение слоев малой размерности информацией из начальной карты признаков путем операции максимального объединения;

- использование вместо пространственного пирамидального объединения, его расширенную модификацию (ASPP) [20];

- интеграция информации из метаданных файла формата DICOM в качестве элемента входного тензора.

Комплексирование вышеописанных подходов способствует улучшению общей эффективности опорной модели в контексте обнаружения объектов малой размерности и низкой контрастности. Внедрение механизма канального внимания внедряет адаптивный фокус на наиболее значимых каналах изображения, повышая чувствительность к локализации мелкогабаритных дефектов. Переход к более эффективным вычислительным операциям, таким как блоки DC/MDC, сократит затраты вычислительных ресурсов и время обработки.

Свертка, разделяемая по глубине, позволит модели с большей точностью сохранять ценную пространственную информацию, одновременно снижая вычислительную сложность сети. Этот подход приобретает особую значимость при обработке больших массивов неразметченных данных в условиях их непрерывного притока, когда скорость анализа становится критически важным фактором наряду с точностью.

Дополнение слоев информацией из начальной карты признаков повышает сохранность мелких деталей, зачастую утрачиваемых при глубокой свертке и обратной операции повышения дискретизации. Такой подход дополняет модель способностью учитывать как глобальные, так и локальные признаки, что является необходимым условием для надежного выявления дефектов.

Использование расширенного пространственного пирамидального объединения способствует увеличению рецептивного поля с сохранением числа параметров и вычислительных затрат. Это, в свою очередь, позволяет учитывать расширенный набор признаков при обработке изображений. Кроме того, расширенная свертка формирует последовательность слоев из целого размерного ряда, что позволяет модели эффективно обрабатывать признаки различного масштаба и уровня детализации.

Использование метаданных DICONDE, в свою очередь, позволяет контекстуализировать представление данных, что способствует формированию дополнительных нейронных связей и признаков дефектов. Обогащение

информацией улучшает обучаемость модели, в результате чего она усиливает устойчивость к вариативности и противоречивости данных. Под вариативностью данных подразумевается обработка изображений дополнительного класса, отсутствующего в обучающей выборке.

Формат DICONDE является модификацией медицинского формата DICOM [21], служащего связующим звеном для идентификации пациентов и передачи качественной и количественной информации между медицинскими учреждениями. Отличие заключается в расширенном наборе тегов, включающих множество параметров, описывающих характеристики используемого оборудования, особенности условий проведения контроля, а также параметры исследуемого объекта [22]. Использование тегов для получения доступной информации в качестве входного тензора способствует ускорению сходимости алгоритма обновления весов и повышению точности модели. Выступая в качестве дополнительного набора признаков при обучении и анализе нового изображения, эта информация значительно усиливает показатель уверенности предсказания модели.

Ключевая идея, лежащая в основе предлагаемого метода синтеза VR- и CV-технологий, заключается в имплементации предобученной модифицированной модели ИНС для интеллектуального ассистирования в процессе обучения специалистов по НК. Рассмотрим порядок взаимодействия обучающегося с интеллектуальным ассистентом.

На первом этапе обучающийся настраивает виртуальное окружение, устанавливая технологические параметры экспонирования, положение радиографического аппарата и элементов оснастки и выполняя другие операции для получения полихроматического изображения в качестве результата радиографического контроля исследуемого объекта (рис. 5).

На втором этапе осуществляется визуальная оценка графического представления результатов контроля объекта. На рисунке 6 представлены примеры результатов, полученных участниками в рамках проведения конкурса профессионального мастерства. На данном этапе обучающийся получает возможность обратиться к интеллектуальному ассистенту, который служит в качестве

экспертной системы, обладающей необходимым набором знаний. При взаимодействии с ассистентом выполняется первичная предобработка изображения для формирования элементов входного тензора. ИНС, предварительно обученная на специализированном датасете, обрабатывает полученную информацию и проводит детектирование контуров и класса наиболее распространенных дефектов, перечень которых формируется на основе ретроспективных данных НК. Процесс детектирования осуществляется с учетом настраиваемого порогового показателя минимальной уверенности предсказания, что позволяет обучающемуся как сконцентрировать внимание на наиболее отчетливых дефектах, так и рассмотреть участки снимка с менее отчетливыми признаками.

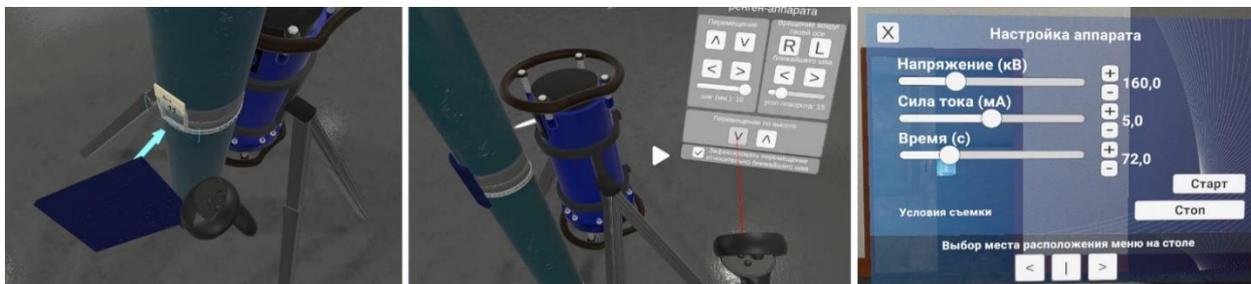


Рис. 5. Настройка детектора, оснастки, штатива и аппарата в виртуальном окружении перед экспонированием

Fig. 5. Setting up the detector, accessories, stand and machine in the virtual environment before exposure

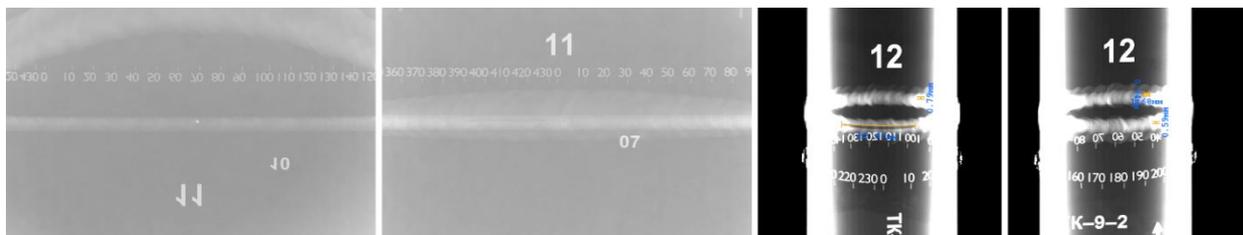


Рис. 6. Примеры графического представления результатов контроля: гибкий детектор; плоский детектор с разметкой в специализированной программе

Fig. 6. Examples of graphical representation of inspection results: flexible detector; flat detector with markup in specialized software

Ассистивная часть объединенной системы графически выделяет местоположение обнаруженного дефекта, представляя как размеченное изображение, так и список обнаруженных дефектов, отсортированный в порядке релевантности результатов. Список дефектов сопровождается детальными описаниями, основанными на информации, заложенной в базу знаний системы. Обучающийся принимает окончательное решение о выявлении факта наличия дефекта в контролируемом образце. Ответы обучающегося фиксируются системой, преподавателем или экспертом, после чего выполняется валидация результатов.

Результаты успешной валидации пополняют набор размеченных данных. Такой подход предоставляет возможность со временем дообучать ИНС с использованием как уже известных, так и совершенно новых видов радиографических изображений. Это позволяет адаптировать веса модели под новые требования к виду изображений или для распознавания дополнительных классов дефектов с сохранением конфигурации ИНС, а также сбалансировать и разнообразить набор данных с целью повышения точности распознавания.

Результаты и их обсуждение

Вышеописанный метод предоставляет возможность улучшения образовательного процесса при подготовке молодых специалистов, не ограничиваясь лишь сферой НК промышленной радиографии, а охватывая смежные области, где практическое обучение сопряжено с

высокими экономическими и экологическими рисками. Такие условия требуют от специалистов не только высокой квалификации, но и исключительной внимательности при выполнении поставленных задач. Рассмотрим несколько примеров теоретического применения синтеза VR- и CV-технологий.

В области медицины хирургическое вмешательство в человеческие ткани сопряжено с решением важной задачи корректного позиционирования медицинского оборудования, расчета и соблюдения наиболее безопасной траектории для достижения требуемого участка. В этом контексте применение виртуального симулятора с интегрированным интеллектуальным ассистентом становится востребованным и эффективным инструментом для овладения практическими навыками и их развития. Ассистент в такой системе может не только выявлять патологические отклонения, но и находить и подсказывать безопасные траектории движения, чтобы сократить срок подготовки и время выполнения операции, снизить риск возникновения осложнений. Ассистент может иметь функции анализа действий, выявления неточностей и предоставлять ценные рекомендации по их устранению, тем самым способствуя повышению безопасности и эффективности как образовательного, так и профессионального хирургического процесса. Кроме того, подобный метод может способствовать повышению скорости развития профессиональных навыков практикующих медиков. Доступ к актуальным данным о новых

методиках и технологиях проведения операций, а также возможность анализа собственной работы с помощью интеллектуального ассистента способствуют непрерывному профессиональному развитию. Это особенно важно в свете стремительного прогресса в медицинской сфере, где ежедневно появляются новые подходы и инструменты борьбы с патологиями.

Другим примером применения синтеза VR- и CV-технологий является использование интеллектуального ассистента при моделировании работы атомных электростанций. Ассистент способен значительно обогатить процессы обучения и симуляции на атомных электростанциях, имитируя реальное окружение, что позволяет операторам и техническим специалистам взаимодействовать с виртуальными моделями оборудования. Таким образом, создается безопасная и контролируемая среда для отработки навыков и принятия решений, приближенных к реальным условиям. Использование VR-технологий позволяет специалистам пройти через сценарии, охватывающие как стандартные процедуры, так и непредвиденные аварийные ситуации. Интерактивная визуализация процессов и работы оборудования помогает быстрее познакомиться с деталями взаимодействия различных факторов и их влияния на сложную систему в целом. CV-система отслеживает действия пользователя, анализируя их для своевременного выявления ошибок в процессе работы. В результате

интеллектуальный ассистент становится важным инструментом не только для подготовки кадров, но и для повышения общей безопасности на атомных электростанциях. Интеграция современных технологии способствует сокращению времени на обучение, повышению доступности, снижению себестоимости обучения, что позволяет расширять компетенции практикующих специалистов в смежные области, а также позволяет повысить квалификацию опытных сотрудников в вопросах действия в редких и сложно воссоздаваемых ситуациях, что, в свою очередь, ведет к снижению рисков и повышению общей эффективности работы атомной станции.

Выводы

Синтезирование CV- и VR-технологий открывает новые горизонты для практико-ориентированного обучения, формируя надежный фундамент для поддержания высокого уровня профессиональной подготовки специалистов в соответствии с современным набором компетенций, предоставляет ценную возможность непрерывного развития и совершенствования навыков с опорой на анализ ретроспективной информации. Интеграция предлагаемого подхода в области, сопряженная с высоким уровнем риска и ответственности за результат в качестве инструмента обучения и поддержки принятия решений, способствует точному знанию установленных норм и корректировке существующих пробелов в знаниях специалистов.

Будущие исследования могут быть направлены на практическую реализацию описанного метода в виртуальном окружении и оценку академической и производственной эффективности. Движение к новым стандартам обучения и

профессиональной подготовки обещает преобразовать доступ к знаниям и навыкам, создавая пространство для инноваций и роста на каждом этапе профессиональной карьеры.

Список литературы

1. Благодетелева Н. К. Тенденции и перспективы использования современных VR-технологий в иноязычном образовании в системе высшего образования России // Мир науки, культуры, образования. 2023. № 3 (100). С. 109–113.

2. Миргородская О. Н. Исследование опыта использования иммерсивных технологий в маркетинговой деятельности предприятий розничной торговли // Предпринимательство, маркетинг и логистика в цифровой экономике: материалы II Всероссийской конференции / Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева. Орёл, 2024. С. 183–190.

3. Рысбай Н. Машинное обучение в передовых исследованиях. процессы разработки // Вестник науки. 2023. Т. 3, № 5 (62). С. 604–611.

4. Оздамиров Р. В. Влияние технологий виртуальной реальности на обучение в цифровой образовательной среде // Перспективы развития высшей школы: материалы I Международной научно-практической конференции / отв. ред. М. В. Баделина. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2020. С. 250–255.

5. Гараев А. И. Развитие образовательных VR-технологий в цифровой среде // Конкурентоспособность субъектов хозяйствования в условиях новых вызовов внешней среды: проблемы и пути их решения: сборник материалов Международной научно-практической конференции / под общ. ред. Н. В. Мальцева. Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного горного университета, 2020. С. 20.

6. Сурай Н. М., Теплая Н. А. Современные тренды в области применения цифровых технологий в российском ретейле // Экономика. Профессия. Бизнес. 2024. № 2. С. 94–104.

7. Гусакова А. А., Кальвинковская В. Д., Байбардина Т. Н. Перспективы использования технологий машинного обучения и искусственного интеллекта в маркетинге. URL: http://lib.i-bteu.by/bitstream/handle/22092014/6382/Гусакова%20А.А._Кальвинковская%20В.Д.%20Перспективы.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата обращения: 11.09.2024).

8. Технологии виртуальной и дополненной реальности в образовательном процессе / И. И. Полевода [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2022. Т. 6, № 1. С. 119–142.

9. Trampus P. Symbiosis of industry 4.0 and non-destructive evaluation // *Buletin Stiintific. Kishinev*, 2023. P. 43–51.
10. Saboonchi H., Blanchette D., Hayes K. Advancements in radiographic evaluation through the migration into NDE 4.0 // *Journal of nondestructive evaluation*. 2021. Vol. 40. P. 1–12.
11. NDE 4.0: Progress, promise, and its role to industry 4.0 / N. G. Meyendorf, N. Ida, R. Singh, J. Vrana // *NDT & E International* 2023. N 140(8). P. 102957. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102957>
12. Классификация современных методов неразрушающего контроля. Возможность их применения для диагностики оборудования нефтегазовой отрасли / А. Е. Нижник [и др.] // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2020. № 5. С. 41–46.
13. Кувшинников В. С., Ковшов Е. Е. Подготовка специалистов по радиационному виду неразрушающего контроля с применением цифровых технологий // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2024. Т. 13, № 4. С. 54–69.
14. A review on YOLOv8 and its advancements / M. Sohan [et al.] // *International Conference on Data Intelligence and Cognitive Informatics*. Singapore: Springer, 2024. P. 529–545.
15. Корчагин В. Д. Анализ современных SOTA-архитектур искусственных нейронных сетей для решения задач классификации изображений и детекции объектов // *Программные системы и вычислительные методы*. 2023. № 4. С. 73–87.
16. Yolov10: Real-time end-to-end object detection / A. Wang [et al.]. URL: <https://arxiv.org/abs/2405.14458> (accessed 11.09.2024).
17. Корчагин В. Д., Кувшинников В. С., Ковшов Е. Е. Критериальный анализ моделей обработки данных радиационного неразрушающего контроля // *International Journal of Open Information Technologies*. 2024. Vol. 12. № 4. P. 23–31.
18. ECA-Net: Efficient Channel Attention for Deep Convolutional Neural Networks / Qilong Wang, Banggu Wu, Pengfei Zhu, Peihua Li, Wangmeng Zuo, Qinghua Hu. URL: <https://arxiv.org/abs/1910.03151> (accessed 11.09.2024).
19. Wang H., Song X. DC-YDLO: A dual channel YOLO for small object defect detection of circuit boards // *2024 5th International Conference on Computer i Vision, Image and Deep Learning (CVIDL)*. IEEE, 2024. P. 1292–1296.
20. DeepLab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs / Liang-Chieh Chen, G. Papandreou, I. Kokkinos, K. Murphy, A. L. Yuille // *IEEE Trans. Pattern. Anal. Mach. Intell.* 2018. N 40 (4). P. 834–848. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2017.2699184>

21. Larobina M. Thirty years of the DICOM standard // *Tomography*. 2023. Vol. 9, N 5. P. 1829–1838.

22. Vrana J. Industrial Internet of things, digital twins, and cyber-physical loops for NDE 4.0 // *Handbook of Nondestructive Evaluation 4.0*. Cham: Springer, 2022. P. 295–328.

References

1. Blagodeteleva N.K. Trends and prospects of using modern VR technologies in foreign language education in the Russian higher education system. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya = The World of Science, Culture, and Education*. 2023; (3):109–113. (In Russ.)

2. Mirgorodskaya O.N. A study of the experience of using immersive technologies in the marketing activities of retail enterprises. In: *Predprinimatel'stvo, marketing i logistika v tsifrovoi ekonomike: materialy II Vserossiiskoi konferentsii = Entrepreneurship, marketing and logistics in the digital economy: Proceedings of the II All-Russian Conference*. Orel: Orel'skii gosudarstvennyi universitet imeni I.S. Turgeneva; 2024. P. 183–190. (In Russ.)

3. Rysbai N. Machine learning in advanced research. development processes. *Vestnik nauki = Bulletin of Science*. 2023;3(5):604–611. (In Russ.)

4. Ozdamirov R.V. The influence of virtual reality technologies on learning in a digital educational environment. In: Badelina M.V. (ed.) *Perspektivy razvitiya vysshei shkoly: materialy I Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Prospects for the development of higher education: Materials of the I International Scientific and Practical Conference*. Tyumen: Tyumen Industrial University; 2020. P. 250–255. (In Russ.)

5. Garaev A.I. Development of educational VR technologies in the digital environment. In: Maltsev N.V. (ed.) *Konkurentosposobnost' sub"ektov khozyaistvovaniya v usloviyakh novykh vyzovov vneshnei sredy: problemy i puti ikh resheniya: Sbornik materialov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Competitiveness of business entities in the context of new challenges of the external environment: problems and ways to solve them: A collection of materials of the International scientific and practical conference*. Yekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta; 2020. P. 20. (In Russ.)

6. Surai N.M., Teplaya N.A. Modern trends in the application of digital technologies in Russian retail. *Ekonomika. Professiya. Biznes = Economy. Profession. Business*. 2024;(2):94–104. (In Russ.)

7. Gusakova A.A., Kalvinkovskaya V.D., Baibardina T.N. Prospects of using machine learning and artificial intelligence technologies in marketing. (In Russ.) Available at: http://lib.i-bteu.by/bitstream/handle/22092014/6382/Гусакова%20А.А._Кальвинковская%20В.Д.%20Perspectives.pdf?sequence=1&isAllowed=y (accessed 09.11.2024).

8. Polevoda I.I., et al. Virtual and augmented reality technologies in the educational process. *Vestnik Universiteta grazhdanskoi zashchity MChS Belarusi = Bulletin of the University*

of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus. 2022;6(1);119–142. (In Russ.)

9. Trampus P. Symbiosis of industry 4.0 and non-destructive evaluation. In: *Buletin Scientific*. Kishinev; 2023. P. 43–51.

10. Saboonchi H., Blanchette D., Hayes K. Advancements in radiographic evaluation through the migration into NDE 4.0. *Journal of nondestructive evaluation = Journal of Non-destructive Evaluation*. 2021;40:1–12.

11. Meyendorf N.G., Ida N., Singh R., Vrana J. NDE 4.0: Progress, promise, and its role to industry 4.0. *NDT & E International*. 2023;(140):102957. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102957>

12. Nizhnik A.E., et al. Classification of modern methods of non-destructive testing. The possibility of their application for diagnostics of equipment in the oil and gas industry. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more = Construction of Oil and Gas Wells on Land and at Sea*. 2020;(5):41–46. (In Russ.)

13. Kuvshinnikov V.S., Kovshov E.E. Training specialists in radiation non-destructive testing using digital technologies. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;13(4):54–69. (In Russ.)

14. Sohan M., et al. A review on YOLOv8 and its advancements. In: *International Conference on Data Intelligence and Cognitive Informatics*. Singapore: Springer; 2024. P. 529–545.

15. Korchagin V.D. Analysis of modern SOTA architectures of artificial neural networks for solving problems of image classification and object detection. *Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody = Software Systems and Computational Methods*. 2023;(4):73–87. (In Russ.)

16. Wang A., et al. Yolov10: Real-time end-to-end object detection. Available at: <https://arxiv.org/abs/2405.14458> (accessed 09.11.2024).

17. Korchagin V.D., Kuvshinnikov V.S., Kovshov E.E. Criterion analysis of data processing models for radiation non-destructive testing. *International Journal of Open Information Technologies*. 2024;12(4):23–31.

18. Qilong Wang, Banggu Wu, Pengfei Zhu, Peihua Li, Wangmeng Zuo, Qinghua Hu. ECA-Net: Efficient Channel Attention for Deep Convolutional Neural Networks. Available at: <https://arxiv.org/abs/1910.03151> (accessed 11.09.2024).

19. Wang H., Song X. DC-YDLO: A dual channel YOLO for small object defect detection of circuit boards. In: *2024 5th International Conference on Computer i Vision, Image and Deep Learning (CVIDL)*. IEEE; 2024. P. 1292–1296.

20. Liang-Chieh Chen, Papandreou G., Kokkinos I., Murphy K., Yuille A. L. DeepLab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs. *IEEE Trans. Pattern. Anal. Mach. Intell.* 2018;(40):834–848. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2017.2699184>

21. Larobina M. Thirty years of the DICOM standard. *Tomography.* 2023;9(5):1829–1838.

22. Vrana J. Industrial Internet of things, digital twins, and cyber-physical loops for NDE 4.0. In: *Handbook of Nondestructive Evaluation 4.0.* Cham: Springer; 2022. P. 295–328.

Информация об авторах / Information about the Authors

Корчагин Валерий Дмитриевич, аспирант,
Российский химико-технологический
университет имени Д. И. Менделеева,
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: ValeraK249@gmail.com,
ORCID: 0009-0003-1773-0085

Valerii D. Korchagin, Post-Graduate
Student, Dmitry Mendeleev University
of Chemical Technology of Russia,
Moscow, Russian Federation,
e-mail: ValeraK249@gmail.com,
ORCID 0009-0003-1773-0085

Кувшинников Владимир Сергеевич,
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник, Научно-исследовательский
и конструкторский институт монтажной
технологии – Атомстрой,
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: KuvshinnikovVS@atomrus.ru,
ORCID: 0000-0002-2565-2510

Vladimir S. Kuvshinnikov, Candidate
of Sciences (Engineering), Senior Researcher,
Joint Stock Company Research and Design
Institute of Installation Technology – Atomstroy,
Moscow, Russian Federation,
e-mail: KuvshinnikovVS@atomrus.ru,
ORCID: 0000-0002-2565-2510

Ковшов Евгений Евгеньевич, доктор
технических наук, профессор, начальник
лаборатории, Научно-исследовательский
и конструкторский институт монтажной
технологии – Атомстрой,
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: KovshovEE@atomrus.ru,
Researcher ID: B-1077-2016,
ORCID: 0000-0003-4758-1730

Evgeny E. Kovshov, Doctor of Sciences
(Engineering), Professor, Head of Laboratory,
Joint Stock Company Research and Design
Institute of Installation Technology – Atomstroy,
Moscow, Russian Federation,
e-mail: KovshovEE@atomrus.ru,
Researcher ID: B-1077-2016,
ORCID: 0000-0003-4758-1730

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-116-128>



УДК 616.12-073.7

Сравнительный анализ критериев диагностики классической кардиологии и кардиометрии

М. Ю. Руденко¹ ✉

¹ Южный федеральный университет
ул. Чехова, д. 22, г. Таганрог 347900, Российская Федерация

✉ e-mail: cardiocode@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Кардиометрия, развиваясь более тридцати лет, достигла определенных результатов, которые позволяют расширить диагностические возможности ЭКГ. Однако критерии кардиометрических диагнозов пока не вошли в нормативные показатели, утвержденные Минздравом. Учитывая возможности кардиометрии и темпы ее развития, в данной статье приводится сопоставление диагнозов, полученных классическим и кардиометрическим методами, с позиции взаимозаменяемости.

Цель исследования – произвести сопоставление кардиологических диагнозов, сделанных на основе ЭКГ, полученных классическим и кардиометрическим методами, используя позицию взаимозаменяемости.

Методы. В данной работе применяется принцип суперпозиции, заключающийся в использовании одной функции для обработки результатов другой. Существующий классический результат описывается с помощью кардиометрической функции. В результате на практике появляется логическая возможность перехода к более точному диагнозу. При этом не разрушается основа классического диагноза.

Результаты. Представлен сравнительный анализ классического кардиологического и кардиометрического методов оценки ЭКГ. Всего рассмотрено 11 диагнозов. По каждому сравнению сделаны конкретные выводы и рекомендации.

Кардиометрия позволяет качественно оценить: а) U-волна на ЭКГ возникает в период фазы ранней диастолы. Она связана с наполнением коронарного кровотока, но диагностировать качество его наполнения можно только с помощью синхронно записанной реограммы от точки T, конца волны T до начала волны U; б) гипер- и гипокальциемию оценивают в фазе S – L по амплитуде фазы; в) гипер- и гипокальциемию оценивают в фазе L – j по амплитуде фазы.

Заключение. Данная работа показывает возможности расширения классического кардиологического диагноза на основе ЭКГ.

Ключевые слова: кардиология; кардиометрия; ЭКГ; диагностика; анализ критериев диагностики.

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

Для цитирования: Руденко М. Ю. Сравнительный анализ критериев диагностики классической кардиологии и кардиометрии // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 4. С. 116–128. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-116-128>

Поступила в редакцию 08.10.2024

Подписана в печать 07.11.2024

Опубликована 27.12.2024

© Руденко М. Ю., 2024

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024;14(4):116–128

Comparative analysis of diagnostic criteria of classical cardiology and cardiometry

Mikhail Y. Rudenko¹ ✉

² Southern Federal University
22 Chekhova Str., Taganrog 347900, Russian Federation

✉ e-mail: cardiocode@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Cardiometry, which has been developing for more than thirty years, has achieved certain results that make it possible to expand the diagnostic capabilities of the ECG. However, the criteria for cardio-metric diagnoses have not yet been included in the regulatory indicators approved by the Ministry of Health. Taking into account the possibilities of cardiometry and the pace of its development, this article provides a comparison of the forecasts obtained by classical and cardiometric methods from the standpoint of interchangeability.

The purpose of research is to compare the cardiological diagnoses made on the basis of ECG obtained by classical and cardiometric methods, using the position of interchangeability.

Methods. In this paper, the principle of superposition is applied, which consists in using one function to process the results of another. The existing classical result is described using a cardiometric function. As a result, in practice there is a logical possibility of moving to a more accurate diagnosis. At the same time, the basis of the classical diagnosis is not destroyed.

Results. A comparative analysis of classical cardiological and cardiometric ECG assessment methods is presented. A total of 11 diagnoses were considered. Specific conclusions and recommendations are made for each comparison. Cardiometry allows a qualitative assessment of: a) The U-wave on the ECG occurs during the early diastole phase. It is associated with the filling of the coronary bloodstream, but the quality of its filling can only be diagnosed using a synchronously recorded rheogram from point T, the end of wave T to the beginning of wave U; b) hyper- and hypocalcemia are evaluated in the S – L phase by the amplitude of the phase; c) hyper- and hypokalemia are evaluated in the L-phase. j by phase amplitude.

Conclusion. This work shows the possibilities of expanding the classical cardiological diagnosis based on an ECG.

Keywords: cardiology, cardiometry, ECG; diagnosis; analysis of diagnostic criteria.

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

For citation: Rudenko M.Y. Comparative analysis of diagnostic criteria of classical cardiology and cardiometry. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2024;14(4):116–128. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-116-128>

Received 08.10.2024

Accepted 07.11.2024

Published 27.12.2024

Введение

Кардиометрия, развиваясь более тридцати лет, достигла определенных результатов, которые позволяют расширить диагностические возможности ЭКГ [1, с. 122]. Однако критерии

кардиометрических диагнозов пока не вошли в нормативные показатели, утвержденные Минздравом. Учитывая возможности кардиометрии и темпы ее развития, в данной статье приводится сопоставление диагнозов, полученных

классическим и кардиометрическим методами, с позиции взаимозаменяемости.

Решение сложных медицинских задач часто требует применения нестандартных подходов. Один из таких подходов – использование принципа суперпозиции функций, хорошо известного в физике, где он является основой для описания многих явлений [2, с. 15]. В контексте медицинской диагностики принцип суперпозиции предполагает последовательное применение нескольких математических функций к исходным данным. Например, мы можем иметь классические результаты медицинского обследования, представленные в виде набора численных показателей (например, результаты анализов крови, ЭКГ, данные функциональных проб). Вместо непосредственной интерпретации этих данных мы можем применить к ним сначала одну математическую функцию, которая, например, выявит скрытые корреляции или паттерны, недоступные визуальному анализу [3, с. 5]. Результат этой первой функции затем обрабатывается второй функцией, которая, в свою очередь, может фокусироваться на других аспектах данных, уточняя и детализируя полученную информацию. Этот многоступенчатый процесс позволяет извлекать из данных значительно больше информации, чем при простой визуальной оценке.

В качестве иллюстрации представим применение кардиометрической функции к классическим результатам электрокардиограммы (ЭКГ). Стандартная интерпретация ЭКГ основывается на визуальном анализе зубцов и интервалов

[4, с. 80]. Однако применение к этим данным кардиометрической функции, представляющей собой сложную математическую модель, способной учитывать тонкие изменения электрической активности сердца, позволит выявить скрытые аномалии, невидимые при обычном анализе. Эта функция может, например, вычислить интегральные показатели, отражающие степень дисбаланса в электрической активности разных частей сердца, или определить вероятность развития аритмий в будущем. Результат работы кардиометрической функции может быть затем обработан другой функцией, интегрирующей эти данные с результатами других исследований (например, данными ультразвукового исследования сердца или анализами крови), чтобы составить более полную картину состояния сердечно-сосудистой системы пациента [5, с. 63].

Такой подход к анализу данных позволяет перейти от традиционной (часто – субъективной) интерпретации медицинских результатов к более объективной и количественной оценке состояния пациента. Это, в свою очередь, ведёт к повышению точности диагноза, позволяет прогнозировать развитие заболевания и разрабатывать более эффективную и персонализированную терапию. При этом важно отметить, что использование принципа суперпозиции функций не отменяет, а дополняет классические методы диагностики. Классические методы остаются важной отправной точкой, а математические функции играют роль мощных инструментов, позволяющих извлечь из этих данных

максимум полезной информации и, таким образом, улучшить качество медицинской помощи. Потенциал применения суперпозиции функций в медицине огромен, и дальнейшие исследования в этой области могут привести к революционным изменениям в диагностике и лечении различных заболеваний [6, с. 144]. Важно подчеркнуть, что разработка и применение таких функций требует участия специалистов как в области медицины, так и в области математического моделирования и обработки данных.

Материалы и методы

Для понимания проблемы развития диагноза с помощью ЭКГ в классической кардиологии целесообразно детально рассмотреть утвержденные Минздравом диагностические критерии, которые используются на практике [7, с. 59]. После определения классических диагнозов можно будет их сравнить с кардиометрическими с целью выявления их совместимости. Это позволит расширить диагностические возможности ЭКГ [8, с. 20].

Результаты и их обсуждение

Ритм и его частота

Показатели ритма и его частоты: частота сердечных сокращений (ЧСС) в состоянии покоя и при физических нагрузках колеблется между 55 и 140 уд./мин. В этом значении параметр зависит от способности сердца создавать ударный и минутный объемы крови (SV, мл) и их взаимосвязи с потреблением кислорода организмом. ЧСС в покое является

информативным показателем и должна находиться в пределах 60–80 уд./мин [9, с. 25]. Отклонение от этого диапазона указывает на напряженность сердечно-сосудистой системы, которая может быть связана с кислородным голоданием. Более значимым показателем является девиация частоты – различие между мгновенными значениями ЧСС. Низкое изменение этого показателя затрудняет функционирование сердца. В классической кардиологии такой параметр не считается обязательным для диагностики и используется только при углубленных обследованиях.

Сравнивая кардиологические и кардиометрические подходы, можно отметить, что нормальная ЧСС в покое должна быть в диапазоне 55–85 уд./мин, и кардиометрия не учитывает тип синусового ритма, поскольку это не раскрывает причины его изменений [10, с. 63].

Классическая кардиология фокусируется на интервалах и сегментах ЭКГ. Однако этапы сердечного цикла не являются основными диагностическими критериями, и связь между ЭКГ и гемодинамикой игнорируется. Изучение продолжительности интервалов без учета параметров гемодинамики в большинстве случаев не является надежным диагностическим критерием, поскольку не учитывает компенсаторные механизмы сердечно-сосудистой системы. Если одна фаза прерывает свою функцию, другая попытается это компенсировать [11, с. 3]. Практические исследования блокад проводящей системы сердца не показали успеха. Заболевание проводимости сердца не поддается лечению ни

медикаментозно, ни хирургически, и многие люди живут с этим состоянием, не замечая проблем. Внедрение кардиостимулятора связано с проблемами центральной нервной системы и зависит от связи гемодинамики с симпатической нервной системой, при этом не существует дублирующих проводящих систем в сердце. Гемодинамика зависит от качества метаболизма сердечной мышцы и состояния коронарных

артерий, которые обеспечивают её кислородом [12, с. 793].

Выводы для сравнения кардиологического и кардиометрического диагноза: Использование в диагностике термина «блокада» должно быть подкреплено конкретными рекомендациями. Необходимо анализировать качество метаболизма в фазах Q–R–S, S–L, L–j.

На рисунке 1 показана фазовая структура сердечного цикла.

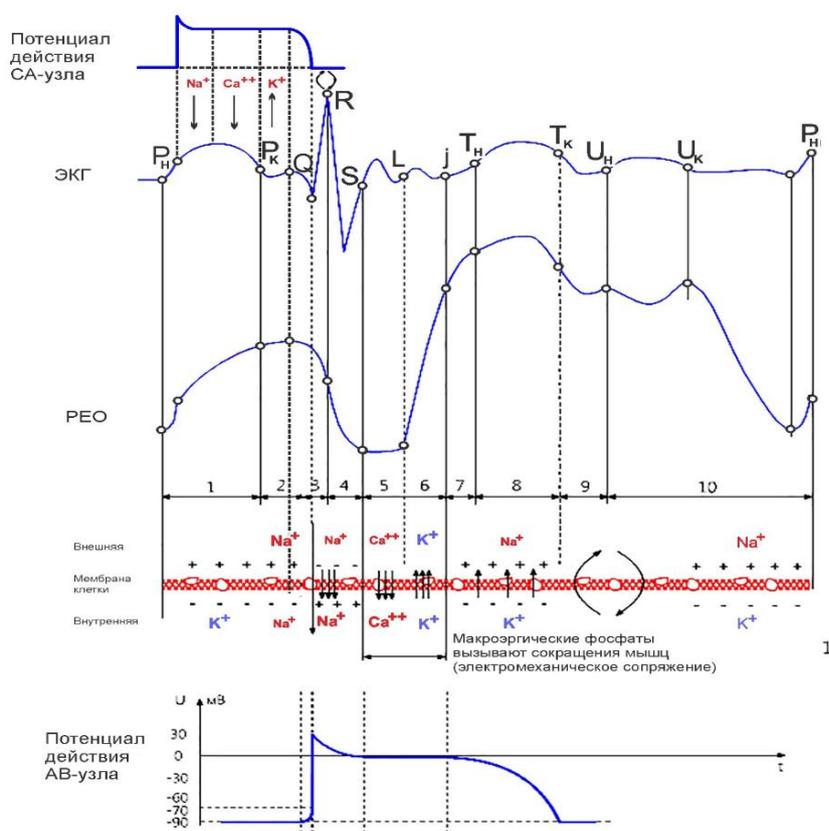


Рис. 1. Фазовая структура сердечного цикла

Fig. 1. The phase structure of the cardiac cycle

Синдром ВПВ (WPW)

Синдром ВПВ (WPW) основан на концепции раннего возбуждения желудочков, что теоретически невозможно, поскольку оно не может нарушить порядок поступления и вывода биохимических

компонентов [13, с. 5]. Раннее возбуждение также исключено, поскольку АВ-узел генерирует потенциал действия только в ответ на определенный уровень артериального давления. АВ-узел действует как барорецептор. Он не может

возбуждаться от других причин, аналогично барорецепторам аорты. Процесс входа Na^+ в клетки и сокращение сердечной мышцы отражается в QRS-комплексе и зависит от аэробных процессов. Далее, происходит электро-механическое сопряжение с входом Ca^{++} и выходом K^+ , создающим разницу давления между желудочком и аортой, что позволяет клапану аорты открываться [14, с. 61].

В традиционной кардиологии нет способа лечения синдрома ВПВ. Следует отметить, что форму ЭКГ можно корректировать дыхательными движениями без медицинского вмешательства, а появление дельта-волн связано с анатомическими особенностями взаимодействия легких и предсердий [15, с. 73].

Выводы для сравнения кардиологического и кардиометрического диагноза: форма ЭКГ, соответствующая ВПВ, не указывает на опасное состояние. Необходимо контролировать потребление кислорода в фазе Q-R-S, что должно быть в пределах нормы.

Зубец Q и развитие зубца R

В традиционной кардиологии форма зубца Q служит индикатором инфаркта миокарда. Если инфаркт исключен, то исследуются гипертрофическая кардиомиопатия или синдром WPW [16, с. 34].

Однако в кардиометрии такой метод анализа не применяется. Здесь фаза P-Q соответствует систоле предсердия и отражает закрытие предсердно-желудочковых клапанов. В момент полного закрытия этих клапанов давление в

желудочках должно достичь уровня, необходимого для запуска генерации импульсов в АВ-узле. Форма фазы P-Q зависит от анатомической структуры лёгких и предсердий, а также от накопления патогенных агентов, включая бактерии, вирусы, грибы и паразитов, имеющих системный характер [17, с. 78].

По этой причине в кардиометрии анализ фазы P-Q является важным параметром электрокардиограммы. Это можно оценить только при выполнении ортостатической пробы и исследовании изменения амплитуды относительно контура. Обычно таких изменений быть не должно, а если таковые имеются, необходимо принять меры для эффективного применения натуропатических препаратов для очищения крови.

Измерение длительности P-Q позволяет судить о растяжимости сердечной мышцы и сопротивлении кровотоку [18, с. 24].

Сравнение кардиологического и кардиометрического диагнозов показывает, что изменение амплитуды фазы P-Q важно для диагностики, так как указывает на изменения в составе крови и возможное поражение органов и систем, связанных с хроническими заболеваниями. Очистка крови натуральными средствами способствует восстановлению состояния организма.

Отметим развитие зубца R

В классической кардиологии раздвоение зубца R считается нарушением проводимости [19, с. 19].

В кардиометрии раздвоение зубца R отражает анатомические особенности сердца, а именно дополнительных хорд, что подтверждается ультразвуковым сканированием [20, с. 50].

Выводы для сравнения кардиологического и кардиометрического диагноза: раздвоение зубца R вызвано не нарушением проводимости, а наличием дополнительных хорд в сердце.

Зубец Р

В классической кардиологии волна Р используется для выявления перикардита. Её форма зависит от качества сокращения миокарда.

Волна Р – систола предсердия. Предназначение систолы предсердия – закрытие предсердно-желудочкового клапана.

Выводы для сравнения кардиологического и кардиометрического диагноза:

В кардиометрии и кардиологии диагнозы по ЭКГ совпадают. Появление нескольких волн указывает на значительное снижение эластичности мышц миокарда, которое наблюдается при мультифокальном кардиосклерозе.

Гипертрофия желудочков

В кардиологии нет четких критериев для выявления гипертрофии желудочков. При кардиометрии гипертрофия не является критерием патологии. Это происходит только при регулярных физических нагрузках. При гипертрофии миокарда амплитуда зубца R уменьшается, а величина SV увеличивается.

Выводы для сравнения кардиологического и кардиометрического диагнозов:

при гипертрофии важно контролировать метаболические параметры.

Зубец Т

В традиционной кардиологии исследование зубца Т позволяет выявить признаки ишемии миокарда и инфаркта задней стенки. В то же время кардиометрия точно показывает, что волна Т отражает лишь изменения диаметра аорты (ее увеличение или уменьшение), которые возникают в результате взаимодействия давления и объёма крови, находящихся между желудочком и аортой.

Для сопоставления кардиологического и кардиометрического диагнозов можно сделать следующие выводы: форма волны Т зависит от соотношения давления в желудочке и аорте. Амплитуда волны Т указывает исключительно на диаметр аорты, который, в свою очередь, изменяется в зависимости от ударного объёма крови. Этот объём способствует её расширению до тех пор, пока давление не станет достаточным для активации барорецепторов аорты, что в конечном итоге приводит к генерации импульса действия, отвечающего за регуляцию кровотока по сосудам.

Электрическая ось сердца

Параметр «электрическая ось сердца» диагностической значимости не имеет. Ось сердца изменяет свое положение при изменении положения тела. [1, с. 122].

Выводы для сравнения кардиологического и кардиометрического диагноза: диагностического смысла для выявления патологии не имеет.

Нарушение ритма

Классическая кардиология рассматривает тахикардию с узким и широким интервалом Q-R-S. Различают регулярную и нерегулярную тахикардию.

Кардиометрия определяет, что нарушения ритма могут возникать в 3 случаях:

1. При локальном периферическом повышении гемодинамического сопротивления, которое вызывает активацию артериовенозных анастомозов.

2. При увеличении количества фибробластов в СА или АВ-узлах.

3. При дыхательной аритмии.

Появление некоторых зубцов Р вызвано мультифокальным склерозом миокарда. Зубцы Р появляются до тех пор, пока не закроется атриовентрикулярный клапан, что нарушается снижением эластичности желудочков.

Выводы для сравнения кардиологического и кардиометрического диагнозов: важно знать, какую форму имеет внесолнечный комплекс QRS. Это критерий для выявления причины экстрасистолии.

В кардиологии также принято оценивать: перикардит; уровень K^+ ; отравление дигиталисом; переохлаждение; тромбоэмболия легочной артерии; декстотардия; дефект межпредсердной перегородки; чередование электрических импульсов, как при наличии искусственных стимуляторов ритма, так и при удлинении интервала QT.

Кардиометрия может быть оценена качественно:

а) зубец U на ЭКГ появляется на стадии ранней диастолы. Это связано с наполнением коронарного кровотока, но диагностикой качества его наполнения является синхронно регистрируемое движение от точки T, которая является концом зубца T, до начала зубца U;

б) высокая (низкая) кальциемия определяется в фазе S-L по амплитуде фазы;

в) гиперкалиемия определяется в фазе L-j по амплитуде фазы;

г) точка j не меняет своего положения на ЭКГ, поскольку это конец электромеханической связи;

д) отсутствует начальная или поздняя поляризация (реполяризация);

е) явления «повторного входа» не существует.

Выводы для сравнения кардиологического и кардиометрического диагнозов: отмеченная парадигма информационных признаков определяет тот факт, что врач функциональной диагностики или кардиолог должен направить пациента на дополнительное обследование. Не существует принципа постановки диагноза «здесь и сейчас».

Выводы

Принятие решения при несоответствии между собой практически полученных данных кардиологическим и кардиометрическим методами:

1. Блокады – нарушение ритма. Любая блокада должна быть оценена с позиции компенсационного механизма, вызванного индивидуальной анатомией

коронарных артерий, или наличием фибробластов в зоне СА- или АВ-узлов, или работой артериовенозных анастомозов. В заключение рекомендуется писать: блокада, сопоставляемая с ... (указать одну из диагностируемых причин).

Противоречия остаются, но появляется возможность эффективной терапии.

2. Синдром WPW. Оценивается с позиции метаболизма мышц сердца. Указываются диапазон норм и измеренное значение кислорода, лактата и креатинфосфата (КрФ). Отсюда следуют рекомендации по коррекции метаболизма. Это очень эффективный подход.

3. Сегмент ST и гипертрофия желудочков. Оценивается с позиции метаболизма и процессов, соответствующих электромеханическому сопряжению. Указывается лактат и креатинфосфат (КрФ). Это очень важные фазы по затратам энергии метаболизма. Они влияют на начальные условия энергии выхода крови в аорту, что отражается на реограмме в виде подъёма давления в фазе быстрого изгнания L-j.

Здесь же оценивается величина ударного объёма SV, характеризующая гипертрофию желудочков.

Подъем сегмента выше изолинии указывает на компенсацию слабости мышц миокарда.

Если при наблюдении депрессии фаз электромеханического сопряжения на ЭКГ, когда они почти сглажены и

начинаются от нижней части зубца S, то это соответствует острой фазе инфаркта и необходимо принять экстренные меры.

4. Зубец Q и развитие зубца R. Важнейшая фаза P-Q, указывающая на чистоту крови или её изменение за счёт бактериальной, вирусной, грибковой или паразитарной природы. Оценивается только при ортопробе. Критерий – изменение амплитуды фазы относительно изолинии. Нормализация чистоты крови устраняет множество симптомов и в первую очередь нормализует артериальное давление.

5. Зубец P. Оценка зубца P (волны P) в случае фиксации нескольких P-волн может быть сопоставлена с классическим через термин «мультифокальный кардиосклероз». Все остальные изменения формы P-волны должны быть сопоставлены с другими проявляющимися изменениями.

6. Зубец T. Форма волны T оценивается только при сопоставлении с другими изменениями и симптомами. Волна T – индикатор расширения аорты, которое наблюдается при принятии препаратов, снижающих артериальное давление.

7. Прочее. Во всех других случаях аналогично сопоставляется номенклатурному диагнозу функциональное изменение одного или зависящих друг от друга нескольких изменений ЭКГ.

Список литературы

1. Кардиометрия. Основы теории и практики / М. Ю. Руденко [и др.]. М.: Изд-во ИКМ, 2020. 214 с.
2. Gromov Y. Y., Gorbunov A. V., Tyutyunnik V. M. Intelligent digitalization of cardiovascular risks // *Cardiometry*. 2022. N 22. P. 77–94.
3. Тютюнник В. М. Реакция организма человека на внешние воздействия: Нобелевская премия по физиологии и медицине за 2021 год // *История науки и техники*. 2022. № 8. С. 3–10.
4. Тютюнник В. М., Бучаченко А. Л. Молекулярный механизм магнитных эффектов для выяснения магнитохимии генов // *Marcus International Symposium*. 2022. Hilton Phuket Arcadia, Thailand, 2022.
5. Филиппов Ю. А. Технологии определения функционального и физиологического состояния человека // *Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ, управление*. 2020. № 5. С. 63–71.
6. Бучаченко А. Л., Тютюнник В. М. Новые рубежи геномной химии // *Перспективные направления исследований в науке и технике: коллективная монография / под ред. В. М. Тютюнника*. Тамбов: Нобелистика, 2021. С. 144–157.
7. Кризис современной медицины: как найти выход / М. Ю. Руденко [и др.] // *Информационные системы и процессы: сборник научных трудов / ред. проф. В. М. Тютюнник*. Тамбов: Нобелистика, 2017. С. 59–64.
8. Сердечно-сосудистая система спортсмена / М. Ю. Руденко [и др.] // *Кардиометрические характеристики физических возможностей до, во время и после занятий спортом*. М.: Издательский дом ИКМ, 2020. 160 с.
9. Norsk P. Adaptation of the cardiovascular system to weightlessness: Surprises, paradoxes and implications for deep space missions // *Acta. Physiol. (Oxf.)*. 2020. N 228(3). P. e13434. <https://doi.org/10.1111/apha.13434>
10. Affect of microgravity on cardiac shape: comparison of pre- and in-flight data to mathematical modeling / C. May, A. Borowski, D. Martin [et al.] // *J. Am. Coll. Cardiol.* 2014. N 63. P. A1096. [https://doi.org/10.1016/S0735-1097\(14\)61096-2](https://doi.org/10.1016/S0735-1097(14)61096-2)
11. Тютюнник В. М. Реакция организма человека на внешние воздействия: Нобелевская премия по физиологии и медицине за 2021 год // *История науки и техники*. 2022. № 8. С. 3–10.
12. Zhu H., Wang H., Liu Z. Влияние реальной и смоделированной невесомости на сердечные и периферические сосудистые функции человека: обзор // *Международный журнал профессиональной медицины и гигиены окружающей среды*. 2015. Т. 28, № 5. С. 793–802.

13. Новиков В. С., Сороко С. И., Шустов Е. В. Дезадаптивные состояния человека и их коррекция при экстремальных воздействиях. СПб.: Политехника – Принт, 2018. С. 5–11.
14. Кардиометрическая таксономия потенциала стресс-индикаторов в различных бытовых ситуациях / А. С. Огнев [и др.] // Кардиометрия. 2019. № 14. С. 101-4. EDN: LNQTO
15. Реверсивные методики как средство повышения достоверности кардиоокулометрической диагностики / Е. В. Бродовская [и др.] // Кардиометрия. 2021. № 18. С. 33–7. EDN: DJTX
16. Алгоритм артериального тонометра / И. С. Явелов [и др.] // Восточно-Европейский научный журнал. 2019. № 9(49).
17. Руденко М. Ю. Теоретические основы фазового анализа сердечного цикла. М.: ИКМ, 2007. 336 с.
18. Гречкина Л. И. Оценка гемодинамических показателей как потенциальных маркеров риска сердечно-сосудистой системы у молодых мужчин с разными типами саморегуляции кровообращения // Анализ риска для здоровья. 2019. № 1. С. 118–124.
19. Кузьминский Ю. Г., Шилько С. В. Метод диагностики сердечно-сосудистой системы на основе одномерной модели гемодинамики // Информатика. 2014. № 4. С. 19–33.
20. ESC/ESH Guidelines for the management of arterial hypertension / Bryan Williams [et al.] // Eur. Heart. J. 2018. N 39(33). P. 3021–3104. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehy339>

References

1. Rudenko M.Y., et al. *Cardiometry. Fundamentals of theory and practice*. Moscow: Izdatel'stvo IKM; 2020. 214 p. (In Russ.)
2. Gromov Y.Y., Gorbunov A.V., Tyutyunnik V.M. Intelligent digitalization of cardiovascular risks. *Cardiometry*. 2022;(22):77–94.
3. Tyutyunnik V.M. Reaction of the human body to external influences: Nobel Prize in Physiology and Medicine for 2021. *Istoriya nauki i tekhniki = History of Science and Technology*. 2022;(8):3–10. (In Russ.)
4. Tyutyunnik V.M., Buchachenko A.L. The molecular mechanism of magnetic effects for elucidating the magnetochemistry of genes. In: *Marcus International Symposium*. 2022. Hilton Phuket Arcadia, Thailand; 2022.
5. Filippov Y.A. Technologies for determining the functional and physiological state of humans. *Vestnik Rossiiskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz, upravlenie = Bulletin of the Russian New University. Series: Complex Systems: Models, Analysis, Management*. 2020;(5):63–71. (In Russ.)

6. Buchachenko A.L., Tyutyunnik V.M. New frontiers of genetic chemistry. In: Tyutyunnik V.M. (ed.) Promising areas of research in science and technology. Tambov: Nobelistika; 2021. P. 144–157. (In Russ.)

7. Rudenko M.Y., et al. The crisis of modern medicine: how to find a way out. In: Tyutyunnik V.M. (ed.) *Informatsionnye sistemy i protsessy: sbornik nauchnykh trudov = Information systems and processes: collection of scientific papers*. Tambov: Nobelistika; 2017. P. 59–64. (In Russ.)

8. Rudenko M.Y., et al. The cardiovascular system of an athlete. Cardiometric characteristics of physical abilities before, during and after sports. Moscow: Izdatel'skii dom IKM; 2020. 160 p. (In Russ.)

9. Norsk P. Adaptation of the cardiovascular system to weightlessness: Surprises, paradoxes and implications for deep space missions. *Acta. Physiol. (Oxf.)*. 2020;228(3):e13434. <https://doi.org/10.1111/apha.13434>

10. May C., Borowski A., Martin D., et al. Affect of microgravity on cardiac shape: comparison of pre- and in-flight data to mathematical modeling. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2014;(63):A1096. [https://doi.org/10.1016/S0735-1097\(14\)61096-2](https://doi.org/10.1016/S0735-1097(14)61096-2)

11. Tyutyunnik V.M. Reaction of the human body to external influences: The N. Belevsky Prize in Physiology and Medicine for 2021. *Istoriya nauki i tekhniki = History of Science and Technology*. 2022;(8):3–10. (In Russ.)

12. Zhu H., Wang H., Liu Z. The effect of real and simulated weightlessness on human cardiac and peripheral vascular functions: a review. *Mezhdunarodnyi zhurnal professional'noi meditsiny i gigieny okruzhayushchei sredy = International Journal of Occupational Medicine and Environmental Hygiene*. 2015;28(5):793–802. (In Russ.)

13. Novikov B.C., Soroko S.I., Shustov E.B. Maladaptive human conditions and their correction under extreme conditions. Saint-Petersburg: Politekhnik – Print; 2018. P. 5–11. (In Russ.)

14. Ognev A.S., et al. Cardiometric taxonomy of the potential of stress indicators in various everyday situations. *Kardiometriya = Cardiometry*. 2019;(14):101-4. (In Russ.) EDN: LNQTO

15. Brodovskaya E.V., et al. Reversible techniques as a means of increasing the reliability of cardioculometric diagnostics. *Kardiometriya = Cardiometry*. 2021;(18):33-7. (In Russ.) EDN: DJTX

16. Yavelov I.S., et al. Arterial tonometer algorithm. *Vostochno-Evropeiskii nauchnyi zhurnal = East European Scientific Journal*. 2019;(9). (In Russ.)

17. Rudenko M.Y. Theoretical foundations of the phase analysis of the cardiac cycle. Moscow: ICM; 2007. 336 p. (In Russ.)

18. Grechkina L.I. Assessment of hemodynamic parameters as potential markers of cardiovascular risk in young men with different types of circulatory self-regulation. *Analiz riska dlya zdorov'ya = Health Risk Analysis*. 2019;(1):118–124. (In Russ.)
19. Kuzminsky Y.G., Shilko S.V. Method of diagnosis of the cardiovascular system based on a one-dimensional model of hemodynamics. *Informatika = Computer Science*. 2014;(4):19–33. (In Russ.)
20. Bryan Williams, et al. ESC/ESH Guidelines for the management of arterial hypertension. *Eur. Heart. J.* 2018;(39):3021–3104. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehy339>

Информация об авторе / Information about the Author

Михаил Юрьевич Руденко, кандидат
технических наук, преподаватель,
Южный федеральный университет,
г. Таганрог, Ростовская область,
Российская Федерация,
e-mail: cardiocode@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-1860-3454

Mikhail Y. Rudenko, Candidate of Sciences
(Engineering), Lecturer, Southern Federal
University, Taganrog, Rostov Region,
Russian Federation,
e-mail: cardiocode@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-1860-3454

Использование пеленгатора радиомаяков на беспилотном летательном аппарате в поисково-спасательных операциях

М. Ю. Алемпьев¹, А. Е. Семенова¹, Д. С. Коптев¹✉,
В. Г. Довбня¹, А. С. Лазарев¹

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

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Резюме

Целью исследования является согласование работы канала пеленгации радиомаяков с системами передачи данных и управления беспилотным летательным аппаратом с помощью пульта дистанционного управления.

Методы опираются на применение принципов радиоэлектроники, диагностики и анализа технического состояния летательных аппаратов. Использовались методы многокритериального анализа, параметрического и структурного синтеза. Изучены особенности пеленгации радиомаяков с беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для отслеживания чрезвычайных ситуаций. Выполнен анализ критической оценки максимальной дальности пеленгации радиомаяков с беспилотного летательного аппарата.

Результаты. Приведены аналитические формулы для расчета предельной дальности пеленгации радиомаяков с беспилотного летательного аппарата. Рассчитано максимальное расстояние пеленгации радиомаяков при использовании 2,4 и 5,8 ГГц внешних антенн на беспилотных летательных аппаратах, применяемых в МЧС России и оснащенных системой цифровой пеленгации.

Заключение. Использование систем пеленгации на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) предоставляет широкие возможности для применения в различных областях. Применение такой комбинаций позволяет эффективно обнаруживать и отслеживать источники радиосигналов, что особенно полезно при проведении поисково-спасательных операций, мониторинге окружающей среды и безопасности. БПЛА, оснащенные пеленгаторами, могут быстро покрывать большие территории, обеспечивая точное определение местоположения сигналов, которые трудно или невозможно зафиксировать с Земли, что делает их незаменимыми в ситуациях, требующих оперативного реагирования и высокой точности. Кроме того, использование БПЛА с пеленгационными системами снижает риски для человеческой жизни, предоставляя возможность выполнять задачи в труднодоступных или опасных зонах.

Ключевые слова: видеотрансляция; совместимость каналов передачи; беспилотный летательный аппарат; пеленгация; радиомаяк; поисково-спасательные операции.

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

Для цитирования: Использование пеленгатора радиомаяков на беспилотном летательном аппарате в поисково-спасательных операциях / М. Ю. Алемпьев, А. Е. Семенова, Д. С. Коптев, В. Г. Довбня, А. С. Лазарев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 14, № 4. С. 129–145. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-129-145>

Поступила в редакцию 17.10.2024

Подписана в печать 16.11.2024

Опубликована 27.12.2024

Assessment of the possibility of using the direction finder of radio beacons on an unmanned aerial vehicle in search and rescue operations

Mikhail Y. Alempiev¹, Anastasia E. Semenova¹, Dmitry S. Koptev¹ ✉, Vitaly G. Dovbnya¹, Aleksey S. Lazarev¹

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

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Abstract

The purpose of research is to coordinate the operation of the direction finding channel of radio beacons with the data transmission systems and control of an unmanned aerial vehicle using a remote control.

Methods. Research methods are based on the application of principles of radio electronics, diagnostics and analysis of the technical condition of aircraft. Methods of multicriterial analysis, parametric and structural synthesis were used. The features of direction finding of radio beacons from unmanned aerial vehicles designed to track emergency situations were studied. An analysis of the critical assessment of the maximum range of direction finding of radio beacons from an unmanned aerial vehicle was performed.

Results. Analytical formulas are given for calculating the maximum range of radio beacon direction finding from an unmanned aerial vehicle. The maximum range of radio beacon direction finding is calculated when using 2.4 and 5.8 GHz external antennas on unmanned aerial vehicles used in the Russian Emergencies Ministry and equipped with a digital direction finding system.

Conclusion. The use of direction finding systems on unmanned aerial vehicles (UAVs) provides wide opportunities for application in various fields. This combination makes it possible to effectively detect and track radio sources, which is especially useful in search and rescue operations, environmental monitoring and safety. UAVs equipped with direction finders can quickly cover large areas, providing accurate location of signals that are difficult or impossible to capture from the ground. This makes them indispensable in situations requiring rapid response and high accuracy. In addition, the use of UAVs with direction finding systems reduces the risks to human life, providing the opportunity to perform tasks in hard-to-reach or dangerous areas.

Keywords: video broadcast; compatibility of transmission channels; unmanned aerial vehicle; direction finding; radio beacon; search and rescue operations.

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

For citation: Alempiev M.Y., Semenova A.E., Koptev D.S., Dovbnya V.G., Lazarev A.S. Assessment of the possibility of using the direction finder of radio beacons on an unmanned aerial vehicle in search and rescue operations. *Serija: Upravljenje, vychislitel'naja tehnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2024;14(4):129–145. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-129-145>

Received 17.10.2024

Accepted 16.11.2024

Published 27.12.2024

Введение

Пеленгатор – это прибор, предназначенный для определения направления на источник радиосигнала [1]. Его работа основана на улавливании электромагнитных волн, испускаемых радиопередатчиком, и вычислении угла между направлением на источник и приемником. Основным принцип работы заключается в сравнении фаз радиосигналов, полученных на нескольких антеннах или на одной поворотной антенне [2]. Сигнал, который достигает антенны с определённого направления, позволяет вычислить угол и определить местоположение радиопередатчика. Пеленгация радиомаяков широко применяется в навигации и морском деле для определения местоположения судов и других объектов на море. Также пеленгация радиомаяков используется в авиации, геодезии, БПЛА и других областях, где необходимо определить точное направление на объект [3].

Интеграция пеленгаторов на беспилотные летательные аппараты существенно расширяет их возможности. БПЛА с пеленгаторами могут быстро и точно определять местоположение источников радиосигналов в труднодоступных или опасных для человека

районах. Такая точность определения критически важна в различных операциях, таких как поиск и спасение, разведка и мониторинг, обнаружение и подавление радиосигналов противника и т. д. Технология установки пеленгаторов на БПЛА требует внимательной интеграции с бортовой электроникой. Учитываются вес устройства, энергопотребление, совместимость с навигационными системами и программное обеспечение для управления аппаратом [4].

Первым шагом является выбор подходящего пеленгатора для БПЛА. Существует множество различных моделей и производителей, поэтому важно выбрать устройство, которое соответствует потребностям и требованиям. После выбора устройства необходимо приступить к интеграции пеленгатора в систему управления БПЛА путем программирования и настройки соединений между устройствами. Далее, следует провести тестирование установленного пеленгатора, чтобы убедиться в правильности его работы, а именно корректности определения направления на источник радиосигнала и передачи этой информации обратно в блок управления БПЛА [5].

Целью исследования является согласование применения канала пеленгации радиомаяков с системами передачи данных и управления беспилотным летательным аппаратом с помощью пульта дистанционного управления.

Материалы и методы

Одним из ключевых факторов, влияющих на систему навигации и управления, является обеспечение совместимости каналов пеленгации радиомаяков и передачи видеосигнала с летательных аппаратов [6]. Пеленгационные радиомаяки предназначены для определения координат объектов и передачи этой информации на наземные станции управления или в центр координации. Одновременно с этим передача видеоданных с БПЛА предоставляет оператору визуальное отображение местности в реальном времени, что позволяет быстро принимать решения на основе текущей обстановки [7].

Для обеспечения бесперебойной работы обоих каналов – радиопеленгации и видеопередачи – крайне важно корректно распределять частотный спектр. Каждый канал должен работать на своей частоте, чтобы избежать взаимных помех и минимизировать вероятность потерь данных. Важную роль играет также управление уровнем помехозащищённости и шумоподавления, что предотвращает снижение качества передачи информации. Это необходимо для обеспечения стабильности работы системы,

особенно в условиях повышенной радиозагруженности и в сложной среде, где много источников сигналов [8].

Для достижения максимальной эффективности можно использовать антенны с различными характеристиками направленности. Например, широконаправленные антенны можно применять для передачи видеоданных, чтобы оператор имел более широкое поле зрения, тогда как антенны с узкой диаграммой направленности лучше подходят для задач радиопеленгации, так как они обеспечивают более точное определение направления на радиомаяк. Такой подход помогает минимизировать взаимные помехи и повысить общую надёжность системы [9].

Для обеспечения оптимальной работы каналов пеленгации радиомаяков и передачи видеоданных с БПЛА необходимо также учитывать технические характеристики оборудования и программного обеспечения. Важно, чтобы оборудование было совместимо и работало стабильно на различных расстояниях и в различных условиях окружающей среды [10].

DJI Phantom 3 – беспилотный летательный аппарат производства компании DJI, который используется Министерством Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (рис. 1).



Рис. 1. БПЛА DJI Phantom 3

Fig. 1. DJI Phantom 3 UAV

БПЛА спроектирован для аэрофото-съемки и видеосъемки с воздуха, обеспечивая пользователям возможность получать качественные кадры с высоты. Его основное назначение – использование в различных сферах, таких как медиа, мониторинг территорий, картография и развлекательные проекты. С его помощью осуществляется детальный обзор как самих зданий и сооружений, так и их внутренних пространств, а также осмотр отдельных участков местности, мостов, дорог и других объектов [11]. Также подходит для выполнения воздушной разведки и определения путей для ввода наземных аварийно-спасательных команд. DJI Phantom 3 имеет классическую квадрокоптерную конструкцию с четырьмя пропеллерами, установленными на крестообразных опорах. Корпус изготовлен из прочного пластика, что обеспечивает защиту внутренних компонентов от повреждений. Одной из главных особенностей DJI Phantom 3 является его встроенная камера, способная снимать

видео в разрешении Full HD (1080p) и делать фотографии с разрешением до 12 мегапикселей. Камера установлена на стабилизированной 3-осевой системе, что обеспечивает получение плавных и стабильных видео и фотографий даже при неровных полетах. Система навигации и управления DJI Phantom 3 состоит из систем GPS и GLONASS для точного позиционирования и автоматической стабилизации полета [12]. Это позволяет выполнять автоматические взлет и посадку, а также возвращение в точку старта.

Управление DJI Phantom 3 осуществляется с помощью пульта дистанционного управления (ПДУ) в сочетании с мобильным устройством (смартфоном или планшетом), на котором установлено специализированное приложение. ПДУ имеет встроенный экран для отображения информации о полете и состоянии БПЛА. DJI Phantom 3 использует съемные литий-полимерные батареи, которые обеспечивают до 25 минут

полета на одном заряде. Время полета может варьироваться в зависимости от условий полета и использования камеры.

БПЛА оснащен системой передачи видеосигнала на расстояние до 2 км, что позволяет оператору видеть то, что видит камера в реальном времени. Также имеется возможность подключения к смартфону или планшету через приложение DJI Go для дополнительного контроля и настроек. DJI Phantom 3 работает на Wi-Fi частоте – 2,4 ГГц, которая используется как для канала передачи данных, так и для канала управления [13].

Радиопеленгаторы, устанавливаемые на БПЛА, представляют собой устройства, предназначенные для определения направления на источник радиосигнала. Эти системы широко применяются в поисково-спасательных операциях, военных миссиях, разведке и мониторинге. Благодаря радиопеленгаторам БПЛА может точно обнаруживать сигналы радиомаяков, которые излучаются объектами или людьми, находящимися в бедственном положении, передавать информацию на наземные станции и выполнять задачи в автономном режиме. Они могут быть различных типов и предназначены для решения разных задач:

1. Фазовые пеленгаторы используют разность фаз между сигналами, принимаемыми несколькими антеннами, для определения направления на источник сигнала. Реализовываются в виде фазированных антенных решеток

(ФАР), которые позволяют электронным способом изменять направление приема сигнала.

2. Амплитудные пеленгаторы используют разницу в амплитуде сигналов, принимаемых различными антеннами, для определения направления на источник. Реализовываются в виде круговых антенных систем или систем с несколькими разнесенными антеннами.

3. Гибридные пеленгаторы комбинируют методы фазовой и амплитудной пеленгации для повышения точности и надежности определения направления на источник сигнала.

4. Цифровые пеленгаторы используют цифровую обработку сигналов для определения направления на источник. Данные системы более компактны и энергоэффективны, что важно для БПЛА.

5. Стереопеленгаторы используют два или более приемников, разнесенных в пространстве, для определения направления на источник сигнала. Они могут быть использованы для более точного определения местоположения источника сигнала в трехмерном пространстве [14].

При установке пеленгаторов на БПЛА необходимо учитывать такие факторы, как размеры и вес пеленгатора, потребление энергии, точность пеленгации, рабочий диапазон частот и стоимость. Также важно, чтобы пеленгатор был совместим с системой управления БПЛА и мог интегрироваться с другими навигационными и сенсорными

системами. Исходя из этого наиболее подходящим является интеграция цифрового пеленгатора с БПЛА.

Перечислим основные особенности цифровых пеленгаторов:

1. Цифровые пеленгаторы обеспечивают высокую точность определения направления на источник радиосигнала благодаря современным алгоритмам обработки данных и использованию высококачественных антенн.

2. Цифровые технологии обеспечивают высокую устойчивость к радиопомехам, что особенно важно при работе в сложных условиях, где могут присутствовать источники помех.

3. Цифровые пеленгаторы более компактны и легки по сравнению с аналоговыми, что важно для их использования на БПЛА.

4. Цифровые пеленгаторы легко адаптируются для работы в различных частотных диапазонах и с различными типами сигналов за счет изменения программного обеспечения.

5. Цифровые пеленгаторы многофункциональны, позволяют выполнять обнаружение сигналов, классификацию источников, мониторинг спектра и т. д.

6. Многие процессы в цифровых пеленгаторах автоматизированы, что уменьшает потребность в ручном управлении и повышает эффективность работы. Также такие пеленгаторы могут передавать данные о направлении и расстоянии в реальном времени на наземные станции или управляющие центры,

что позволяет операторам оперативно принимать решения [15].

Примеры цифровых пеленгаторов включают системы, использующие методы быстрого преобразования Фурье (БПФ) для анализа спектра сигналов, алгоритмы корреляционной обработки для определения разности фаз между сигналами, принимаемыми различными антеннами, и другие методы цифровой обработки сигналов.

Одним из конкретных примеров цифрового пеленгатора является система Raven производства компании ELTA Systems, которая является подразделением корпорации Israel Aerospace Industries. Эта система предназначена для использования на БПЛА и обеспечивает высокоточное определение направления на источники радиоизлучения в реальном времени.

Основные характеристики системы Raven:

1. Антенная система состоит из нескольких антенн, которые могут быть установлены на БПЛА в различных конфигурациях для обеспечения широкого диапазона углов пеленгации.

2. Сигналы, принятые антеннами, преобразуются в цифровую форму с помощью высокоскоростных АЦП.

3. Цифровой сигнальный процессор обрабатывает цифровые сигналы с использованием алгоритмов БПФ, корреляционных методов и других технологий для определения направления на источник радиоизлучения.

4. Программное обеспечение реализует управление системой, настройку параметров обработки сигналов, визуализацию результатов пеленгации и интеграцию с другими системами управления БПЛА.

5. Интерфейс пользователя предоставляет оператору возможность мониторинга состояния системы, настройки её параметров и анализа результатов пеленгации через графический пользовательский интерфейс.

6. Система Raven разработана для установки на различные типы БПЛА, что делает ее удобной для использования в

полевых условиях и выполнения задач радиоэлектронной разведки.

7. Энергопотребление системы Raven для работы антенн, модуля управления и других компонентов совместимо с ресурсами БПЛА, на котором устанавливается система [16].

8. Система пеленгации Raven работает в S (2–4 ГГц) и C-диапазонах (4–8 ГГц) и требует дополнительного подключения внешней антенны.

Основные технические характеристики системы пеленгации Raven (табл. 1).

Таблица 1. Технические характеристики системы пеленгации Raven

Table 1. Technical characteristics of the direction finding system Raven

Характеристика	Значение
Рабочий диапазон	20 MHz – 6 GHz
Дополнительный диапазон (опционально)	6 GHz – 18 GHz
Азимутальная точность	$\leq 1^\circ$ (в зависимости от частоты и других факторов)
Вертикальная точность	$:\leq 5^\circ$ (в зависимости от частоты и других факторов)
Время пеленгации одного источника	$:\leq 1$ с
Время пеленгации нескольких источников	≤ 2 с
Максимальное количество отслеживаемых источников	8
Тип антенны	Активная фазированная антенная решетка (AFAA)
Количество элементов антенны	128
Тип питания	28 В постоянного тока
Интерфейс управления	Встроенный дисплей, клавиатура и сенсорный экран
Интерфейсы связи	Ethernet, RS-232, USB
Совместимость с внешними системами	Совместима с системами управления и отображения, такими как карты и системы управления огнем
Температура окружающей среды	-10°C до $+50^\circ\text{C}$
Влажность	0% - 95% относительной влажности
Защита от воздействия окружающей среды	IP55

Для интеграции системы пеленгации Raven в работу DJI Phantom 3 необходимо соблюсти условие работы в разных частотных диапазонах. Так как БПЛА работает на частоте 2,4 ГГц, то внешние антенны системы пеленгации должны быть на другой частоте для исключения образования интерференции. В качестве внешней антенны для работы в С-диапазоне может быть использована направленная антенна 5,8 ГГц с усилением 20 дБ [17].

В условиях отсутствия помех заявленная производителем максимальное удаление DJI Phantom 3 от ПДУ составляет 2 км по горизонтали и 6 км по вертикали. Важно отметить, что реальные расстояния могут варьироваться в зависимости от окружающей среды, включая наличие зданий, деревьев, а также атмосферных условий, которые могут влиять на сигнал [18].

Чтобы рассчитать максимальное расстояние приёма сигнала на антенну 5,8 ГГц с усилением 20 дБ в условиях отсутствия помех, можно использовать формулу свободного пространства (дБ) [19]:

$$F_{SPL} = 20\lg(d) + 20\lg(f) + 20\lg(4\pi/c), \quad (1)$$

где d – расстояние, м; f – частота, Гц; c – скорость света, м/с.

Предположим, что мощность передатчика $P_t = 20$ дБ·м и чувствительность приемника $P_r = -90$ дБ·м известны, найдем F_{SPL} по формуле

$$F_{SPL} = P_t + G_t + G_r - P_r, \quad (2)$$

где G_t и G_r – усиление передающей и приемной антенн (в данном случае – $G_t = G_r = -20$ дБ·м).

Таким образом, подставив значения, получим $F_{SPL} = 150$ дБ·м. Исходя из этого получим, что максимальное расстояние приема сигнала в идеальных условиях составляет примерно 540 м.

В условиях города сигнал будет затухать сильнее из-за препятствий, таких как здания, застройки и другие конструкции. Для учета этого добавим к расчёту коэффициент затухания, который обычно составляет от 10 до 20 дБ в зависимости от плотности застройки [20]. Примем среднее значение дополнительного затухания равным 15 дБ, тогда $F_{SLP} = 165$ дБ·м. Таким образом, в условиях города максимальное расстояние приема сигнала составит приблизительно 306 м.

Чтобы рассчитать максимальное расстояние приема сигнала на антенну с частотой 2,4 ГГц с усилением 20 дБ в условиях отсутствия помех, используем формулу (1) для свободного пространства. Так же, как и для первого случая, при $F_{SPL} = 150$ дБ·м получим, что в идеальных условиях максимальное расстояние приёма сигнала составит примерно 1,32 км.

Чтобы учесть влияние передатчика БПЛА, работающего на частоте 2,4 ГГц с усилением 20 дБ·м на расстоянии 10 см от внешней антенны системы Raven, нужно рассмотреть возможные помехи, которые он может создавать.

Проведём расчёт уровня сигнала на расстоянии 10 см от внешней антенны (дБ·м):

$$R_{SPR} = P_t + G_t - 20 \log_{10}(d), \quad (3)$$

где $P_t = 20$ дБ·м; $G_t = 0$ дБ (предполагаем без усиления антенны); $d = 0,1$ м.

Таким образом, уровень сигнала равен 40 дБ·м.

Предположим, что приемник может справиться с сигналами, превышающими его чувствительность, но уровень шума увеличится. Это может снизить чувствительность на величину сигнала помехи. Если уровень помехи составляет 40 дБ·м, а чувствительность приемника -90 дБ·м, то эффект будет значительным. Однако на практике приемники могут фильтровать такие помехи, если они имеют узкополосные фильтры. Если считать, что помеха уменьшается на 10 дБ из-за фильтрации, новая эффективная чувствительность будет равна $P_{r \text{ эфф}} = -80$ дБ·м, тогда с учетом выражения (2)

F_{SPL} составит 140 дБ. С учётом этого максимальное расстояние окажется равным $d = 0,42$ км. Таким образом, с учетом помех от передатчика максимальное расстояние приема сигнала может снизиться до примерно 420 м.

Результаты и их обсуждение

Таким образом, исходя из проведенных расчётов становится возможным утверждать, что использование антенн 2,4 ГГц и 5,8 ГГц с системой Raven, установленной на БПЛА DJI Phantom 3, в виде внешнего модуля является

рациональным. Показано, что при использовании антенны 5,8 ГГц не возникает интерференции между системой пеленгации и каналами передачи данных БПЛА, однако максимальная дальность обнаружения радиометок составит 540 м на открытом пространстве и 306 м в городских условиях.

При использовании антенн 2,4 ГГц возникает эффект интерференции из-за использования этого же частотного диапазона БПЛА, поэтому максимальное расстояние, на котором возможно определить радиомаяк, составит 420 м.

Также стоит упомянуть другие известные модели БПЛА, которые используются сотрудниками МЧС России, такие как ZALA 421-22 и Supercam S-350.

ZALA 421-22 – российский беспилотный летательный аппарат, разработанный компанией ZALA Aero. Он предназначен для проведения разведывательных и наблюдательных операций, характеристики представлены ниже (табл. 2).

ZALA 421-22 имеет аналогичные характеристики приемо-передающего устройства, как у DJI Phantom 3, поэтому при использовании частоты 2,4 ГГц БПЛА и антенн 2,4 ГГц и 5,8 ГГц результаты по дальности пеленгации радиомаяков будут аналогичны DJI Phantom 3. Однако, если ZALA 421-22 используется на частоте 900 МГц, то, используя формулы (1) и (2), получим максимальное расстояние пеленгации с антенной 2,4 ГГц в идеальных условиях 1983 м.

Supercam S-350 – российский беспилотный летательный аппарат (БПЛА), разработанный для различных задач, таких как аэрофотосъёмка, мониторинг и

разведка. Supercam S-350 разработан с учётом российских климатических условий, что позволяет ему эффективно

работать в различных погодных условиях. Характеристики Supercam S-350 представлены ниже (табл. 3).

Таблица 2. Основные характеристики ZALA 421-22

Table 2. Main characteristics of ZALA 421-22

Характеристика	Значение
Размах крыла	Около 2,5 метров
Максимальная взлетная масса	До 10 кг
Продолжительность полета	До 3 часов
Радиус действия	До 50 км
Крейсерская скорость	Около 65–110 км/ч
Максимальная высота полета	До 5000 метров
Система управления	Автоматическая с возможностью ручного управления
Используемые частотные диапазоны	900 МГц и 2,4 ГГц
Тип БПЛА	Малогобаритный вертолетного типа

Таблица 3. Основные характеристики ZALA 421-22

Table 3. Main characteristics of ZALA 421-22

Характеристика	Значение
Максимальная дальность полёта	До 250 км
Время полёта	До 4 часов
Максимальная скорость	Около 120 км/ч
Полезная нагрузка	До 5 кг
Тип двигателя	Электрический
Рабочая температура	От –30°C до +50°C
Используемые частотные диапазон	2,4 ГГц
Тип БПЛА	Самолетного типа с неподвижным крылом

На основании информации о частотном диапазоне 2,4 ГГц можно сделать вывод, что при установки системы пеленгации Raven на Supercam S-350 максимальная дальность пеленгации будет такая же, как и БПЛА DJI Phantom 3.

Выводы

Подводя итог вышесказанному, можно сказать, что в рамках данной статьи:

– оценена возможность использования системы цифровой пеленгации Raven на беспилотном летательном аппарате DJI Phantom 3, используемом МЧС России;

– исследована максимальная дальность канала пеленгации между БПЛА с дополнительной антенной 5,8 ГГц и радиомаяком, которая определена при прямой видимости и составляет 540 м, а для городской местности – 306 м;

– исследована максимальная дальность канала пеленгации между БПЛА с дополнительной антенной 2,4 ГГц и радиомаяком, составляющая 420 м;

– исследована максимальная дальность канала пеленгации между БПЛА, работающим на частоте 900 МГц, с дополнительной антенной 2,4 ГГц и радиомаяком, составляющая 1983 м.

Таким образом, совместимость канала пеленгации радиомаяков с каналом

передачи видеоданных с БПЛА играет важную роль в обеспечении эффективной работы системы навигации и управления БПЛА. Правильный выбор оборудования, использование оптимальных частотных диапазонов и уровень защиты от помех позволяют обеспечить стабильность, надежность передачи данных и оперативное принятие решений оператором.

Список литературы

1. Старовойтов Е. И. Навигационное обеспечение мониторинга подстилающей поверхности БПЛА с пассивным оптическим датчиком // Радиостроение. 2020. № 5. С. 13–41.
2. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. СПб.: Научное издание, 2020. 204 с.
3. Основные направления создания высоконадёжной системы связи и управления БПЛА / И. Н. Пантелеймонов, А. В. Белозерцев, А. А. Монастыренко, В. В. Бочва, А. В. Наумкин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 6 (723). С. 78–88.
4. Исследование алгоритмов перестановочного декодирования в системах управления БПЛА / И. А. Сорокин, П. Н. Романов, Т. Е. Кондраненкова, В. А. Ружьев, Н. А. Стенина, Н. Н. Пушкаренко // Аграрная наука. 2022. № 11. С. 133–140.
5. Применение технологии виртуальных антенных решеток для повышения точности пеленгатора воздушного базирования / Е. А. Ищенко, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, С. М. Фёдоров, И. А. Черноиваненко // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18, № 3. С. 90–94.
6. Сущенко О. А., Безкоровайный Ю. Н., Голицын В. А. Использование инерциальных технологий в информационном обеспечении систем управления БПЛА // Современные средства связи. 2021. Т. 1, № 1. С. 95–99.
7. Оценка дальности передачи видеоинформации различного качества при мониторинге чрезвычайных ситуаций с беспилотного летательного аппарата / М. Ю. Алемпьев, Д. С. Коптев, В. Г. Довбня, Е. В. Скрипкина // Известия Юго-Западного

государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 31–44.

8. Тюльков М. В., Эмилбекова З. Э., Юрковская Г. И. Разработка проекта внедрения беспилотных летательных аппаратов в охранно-предупредительную деятельность телекоммуникационных компаний // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2022. Т. 2. С. 956–958.

9. Об одном способе определения направления на аварийный источник излучения (радиомаяк) с помощью фазового пеленгатора, установленного на поисково-спасательном квадрокоптере / М. Ф. Волобуев, М. А. Замыслов, А. М. Мальцев [и др.] // Проблемы безопасности полетов. 2023. № 12. С. 25–36.

10. Разностно-дальномерный метод определения координат радиомаяка с использованием беспилотных летательных аппаратов / С. В. Соколов, В. А. Погорелов, А. А. Манин, К. Т. Ломтатидзе // Автометрия. 2022. Т. 58, № 1. С. 91–103.

11. Применение технологии виртуальных антенных решеток для повышения точности пеленгатора воздушного базирования / Е. А. Ищенко, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, С. М. Фёдоров, И. А. Черноиваненко // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. № 3. С. 90–94.

12. Синтез малогабаритного фазового пеленгатора авиационного базирования / А. В. Азаров, М. Н. Караваев, С. С. Рожков, А. О. Славянский, К. А. Смолка // Труды МАИ. 2022. № 123. С. 12.

13. Способ однопозиционного местоопределения источников радиоизлучения с использованием бортового радиопеленгатора беспилотного летательного аппарата вертолетного типа / А. В. Ашихмин, А. Д. Виноградов, А. М. Рембовский, В. А. Сладких // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 4. С. 40–56.

14. Першин П. В. Варианты реализации радиопеленгаторных антенных решеток для малого беспилотного летательного аппарата // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16, № 2. С. 77–82.

15. Реализация высококомобильного комплекса пеленгации для БПЛА с применением виртуальных магнитных диполей / Е. А. Ищенко, Ю. Г. Пастернак, С. М. Федоров, И. А. Баранников // Труды учебных заведений связи. 2024. № 4. С. 48–61.

16. Паринов М. Л., Нистратов Р. С., Солайман К. Я. Исследование точности определения направления на источник излучения в условиях неопределенности в местоположении элементов антенной системы пеленгатора // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2022. № 21. С. 110–122.

17. Аджахунов Э. А., Николаев О. В. Комплекс перехвата управления бпла // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2021. № 2 (37). С. 35–41.

18. Основные направления создания высоконадежной системы связи и управления БПЛА / И. Н. Пантелеймонов, А. В. Белозерцев, А. А. Монастыренко, В. В. Ботца, А. В. Наумкин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 6 (723). С. 78–88.
19. Алаторцев Д. В. Анализ эффективных методов оценки дальности и алгоритмов обработки видеоинформации на БПЛА // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 12. С. 255–261.
20. Лянгузов Д. А., Плюснин Н. И. Безопасность и уязвимость сетей беспилотных летательных аппаратов: обзор // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 7. С. 528–531.

References

1. Starovoitov E.I. Navigation support for monitoring the underlying surface of a UAV with a passive optical sensor. *Radio Engineering*. 2020;(5):13–41. (In Russ.)
2. Makarenko S.I. Countering unmanned aerial vehicles: monografiya. Saint-Petersburg: Naukoemkie tekhnologii; 2020. 204 p. (In Russ.)
3. Panteleimonov I.N., Belozertsev A.V., Monastyrenko A.A., Botsova V.V., Naumkin A.V. The main directions of creating a highly reliable UAV communication and control system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2020;(6):78–88. (In Russ.)
4. Sorokin I.A., Romanov P.N., Kondranenkova T.E., Ruzhev V.A., Stenina N.A., Pushkarenko N.N. Research of permutation decoding algorithms in UAV control systems. *Agrarnaya nauka = Agrarian Science*. 2022;(11):133–140. (In Russ.)
5. Ishchenko E.A., Pasternak Y.G., Pendyurin V.A., Fedorov S.M., Chernoiivanenko I.A. Application of virtual antenna array technology to increase the accuracy of an air-based direction finder. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2022;18(3):90–94. (In Russ.)
6. Sushchenko O.A., Bezkorovainy Y.N., Golitsyn V.A. The use of inertial technologies in information support of UAV control systems. *Sovremennye sredstva svyazi = Modern Means of Communication*. 2021;1(1):95–99. (In Russ.)
7. Alempyev M.Y., Koptev D.S., Dovbnaya V.G., Skripkina E.V. Evaluation of the transmission range of video information of various quality in emergency monitoring from an unmanned aerial vehicle. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, in-formatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;13(2):31–44. (In Russ.)

8. Tyulkov M.V., Emilbekova Z.E., Yurkovskaya G.I. Development of a project for the introduction of unmanned aerial vehicles into the security and preventive activities of telecommunications companies. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki = Actual Problems of Aviation and Cosmonautics*. 2022;2:956–958. (In Russ.)

9. Volobuev M.F., Zamyslov M.A., Maltsev A.M., et al. On one method of determining the direction to an emergency radiation source (radio beacon) using a phase direction finder mounted on a search and rescue quadcopter. *Problemy bezopasnosti poletov = Problems of Flight Safety*. 2023;(12):25–36. (In Russ.)

10. Sokolov S.V., Pogorelov V.A., Manin A.A., Lomtadidze K.T. The difference-range method for determining the coordinates of a radio beacon using unmanned aerial vehicles. *Avtometriya = Autometry*. 2022;58(1):91–103. (In Russ.)

11. Ishchenko E.A., Pasternak Y.G., Pendyurin V.A., Fedorov S.M., Chernoiivanenko I.A. Application of virtual antenna array technology to improve the accuracy of an air-based direction finder. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2022;(3):90–94. (In Russ.)

12. Azarov A.V., Karavaev M.N., Rozhkov S.S., Slavyansky A.O., Smolka K.A. Synthesis of a small-sized aircraft-based phase direction finder. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2022;(123):12. (In Russ.)

13. Ashikhmin A.V., Vinogradov A.D., Rembovsky A.M., Sladkikh V.A. A method for single-position location of radio sources using an on-board direction finder of a helicopter-type unmanned aerial vehicle. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Control, Communications and Security Systems*. 2021;(4):40–56. (In Russ.)

14. Pershin P.V. Implementation options for radio direction finding antenna arrays for small unmanned aerial vehicles. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2020;16(2):77–82.

15. Ishchenko E.A., Pasternak Y.G., Fedorov S.M., Barannikov I.A. Implementation of a highly mobile direction finding system for UAVs using virtual magnetic dipoles. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi = Proceedings of Educational Institutions of Communications*. 2024;(4):48–61. (In Russ.)

16. Parinov M.L., Nistratov R.S., Solaiman K.Y. Investigation of the accuracy of determining the direction to the radiation source under conditions of uncertainty in the location of the elements of the antenna system of the locator. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika = Aerospace Forces. Theory and Practice*. 2022;(21):110–122. (In Russ.)

17. Adjakhunov E.A., Nikolaev O.V. UAV control interception complex. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz-Antei» = Bulletin of the Almaz-Antey East Kazakhstan Region Concern*. 2021;(2):35–41. (In Russ.)

18. Panteleimonov I.N., Belozertsev A.V., Monastyrenko A.A., Botsva V.V., Naumkin A.V. The main directions of creating a highly reliable UAV communication and control system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2020;(6):78–88. (In Russ.)

19. Alatortsev D.V. Analysis of effective methods for estimating the range and algorithms of video information processing on UAVs. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings Tula State University. Technical Sciences*. 2020;(12):255–261. (In Russ.)

20. Lyanguzov D. A., Plyusnin N. I. Security and vulnerability of unmanned aerial vehicle networks: an overview. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. = Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2023;(7):528–531. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Алемпьев Михаил Юрьевич, аспирант кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mihail.alempiev@mail.ru, ORCID: 0009-0009-6412-7899

Mikhail Y. Alimpiev, Post-Graduate Student of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mihail.alempiev@mail.ru, ORCID: 0009-0009-6412-7899

Семёнова Анастасия Евгеньевна, студент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nastiasemenova2512@gmail.com, ORCID: 0009-0004-6462-8574

Anastasia E. Semenova, Student of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nastiasemenova2512@gmail.com, ORCID: 0009-0004-6462-8574

Коптев Дмитрий Сергеевич, старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: d.s.koptev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7759-579X

Dmitry S. Koptev, Senior Lecturer of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: d.s.koptev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7759-579X

Довбня Виталий Георгиевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vit_georg@mail.ru

Лазарев Алексей Сергеевич, студент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vapapan@yandex.ru

Vitaly G. Dovbnya, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vit_georg@mai

Aleksey S. Lazarev, Student of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vapapan@yandex.r

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-146-163>



УДК 621.396

Организация data-центров: информационно-когнитивные аспекты

А. С. Сизов¹, Е. А. Титенко¹✉, Ю. А. Халин¹,
М. А. Титенко¹, Р. В. Калинин¹

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

✉ e-mail: johntit@mail.ru

Резюме

Целью исследования является систематизация свойств data-центров и поиск путей повышения производительности сети центров на основе коллективного доступа, совмещения шагов хранения и обработки информации и ее тиражирования.

Методы исследования основаны на теории организации сложных информационно-аналитических систем и систем искусственного интеллекта. Применение принципов распределено-территориальной организации центров, отложенного сбора данных, обработки данных на основе расчетно-аналитических моделей и моделей представления знаний позволяет создавать архитектуры data-центров, реконфигурируемые под базовые вычислительные процессы. Для описания архитектуры верхнего уровня были созданы и проанализированы типовой и модифицированный информационно-управляющие циклы обработки информации. На основе методов теории графов дана оценка сложности рассмотренным циклом. При этом использованы как стандартные количественные, так и структурные показатели, что позволило получить рекомендации по организации data-центров.

Результаты. Созданный модифицированный информационно-управляющий цикл сетевой обработки информации отличается повышением связности вершин и внутренних циклов обработки. Сравнение рассчитанных средних выходных показателей по стандартному и модифицированному циклам показало целесообразность соединения шагов в составе циклов, моделирующих некоторые когнитивные возможности человека при обработке большого объема неструктурированных данных (декомпозиция, агрегация, анализ, обобщение). Построенный модифицированный цикл имеет более высокие средние и относительные показатели сложности.

Заключение. Совмещение в информационно-управляющем цикле шагов хранения, обработки информации и выделения новых закономерностей позволяет трактовать современные data-центры как интеллектуальные сетевые хранилища-поисковики. Созданный модифицированный информационно-управляющий цикл позволяет итерационно выполнять шаги систематизации, обобщения, анализа данных для получения новых порций информации. Эта особенность обеспечивает повышение общей производительности data-центра и снижение стоимости владения информационными ресурсами.

Ключевые слова: сеть; data-центр; структурная сложность; искусственный интеллект; граф.

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

© Сизов А. С., Титенко Е. А., Халин Ю. А., Титенко М. А., Калинин Р. В., 2024

Для цитирования: Организация data-центров: информационно-когнитивные аспекты / А. С. Сизов, Е. А. Титенко, Ю. А. Халин, М. А. Титенко, Р. В. Калинин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 4. С. 146–163. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-146-163>

Поступила в редакцию 08.10.2024

Подписана в печать 11.11.2024

Опубликована 27.12.2024

Building data centers: information and cognitive aspects

Alexander S. Sizov¹, Evgeny A. Titenko¹ ✉, Yuri A. Khalin¹,
Mikhail A. Titenko¹, Roman V. Kalinin¹

¹ Southwest State University

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

✉ e-mail: johntit@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to systematize the properties of data centers and to find ways to increase the productivity of a network of centers based on collective access, combining the steps of storing and processing information and its replication.

Methods. The research methods are based on the theory of organization of complex information and analytical systems and artificial intelligence systems. The application of the principles of distributed-territorial organization of centers, deferred data collection, data processing based on computational and analytical models and knowledge representation models allows you to create data center architectures reconfigurable for basic computing processes. To describe the architecture of the upper level, standard and modified information and control cycles of information processing were created and analyzed. Based on graph theory methods, the complexity of the considered cycles is estimated. At the same time, both standard quantitative and structural indicators were used, which made it possible to obtain recommendations on the organization of data centers.

Results. The modified information and control cycle of network information processing is characterized by increased connectivity of vertices and internal processing cycles. A comparison of the calculated average output indicators for standard and modified cycles showed the expediency of combining steps in cycles that simulate certain human cognitive capabilities when processing a large amount of unstructured data (decomposition, aggregation, analysis, generalization). The constructed modified cycle has higher average and relative complexity indicators.

Conclusion. The combination of information storage and processing steps in the information management cycle and the identification of new patterns makes it possible to interpret modern data centers as intelligent network storage-search engines. The created modified information and control cycle allows iteratively performing the steps of systematization, generalization, and data analysis to obtain new pieces of information. This feature provides an increase in the overall productivity of the Data Center and a reduction in the cost of ownership of information resources.

Keywords: network; data center; structural complexity; artificial intelligence; graph.

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

For citation: Sizov A.S., Titenko E.A., Khalin Yu.A., Titenko M.A., Kalinin R.V. Building data centers: information and cognitive aspects. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;14(4):146–163

Введение

Современные data-центры как опорные узлы цифровой инфраструктуры заняли ведущее положение в методах и средствах повышения эффективности получения, обработки больших неструктурированных данных и извлечения из них дополнительной информации [1]. С одной стороны, такие центры выступают как хранилища корпоративных, служебных данных для организаций и компаний, органов государственной власти, сетевых холдингов, используя установленный порядок и процедуры разграничения доступа по уровням информации, с другой – современные data-центры – это самостоятельные узлы для выявления метаданных, новых закономерностей и их применения в смежных областях, что позволяет существенно ускорить бизнес и производственные процессы. Согласно прогнозам ведущих аналитических компаний, общий объем мирового рынка технологий обработки больших данных и бизнес-аналитики будет ежегодно расти на 10–12%. Объем российского рынка, по разным оценкам, составляет пока около 10 млрд руб. Однако прогнозируется его увеличение до 250 млрд руб. в 2024 г., что уже является существенным фактором развития экономики и IT-индустрии [2].

Ключевой момент – коллективный доступ к информации снижает стоимость

владения ресурсом за счет многократного воспроизводства информации и ее тиражирования. Ранее выделенные процессы сбора, накопления, анализа и принятия решений основывались на принципах локализации (информация может появиться в одном месте), ограниченности распространения (срок жизни и доступность информации конечны), специализации (информация понятна узкому кругу лиц и не может быть интерпретирована извне). Теперь data-центры являются локомотивами новых принципов и подходов: информация распределена по инфраструктуре (принцип распределенности и трансформации); однажды возникнув, информация циркулирует в информационной среде (принцип свободного доступа); полученная информация общепонятна и интерпретируема (принцип равноправного владения и принятия решений) [3].

Большие данные – это структуры форматы данных, имеющие огромный объем и нетрадиционную логику для типовых аналитических приложений и программ [2]. Их еще можно определить по таким характеристикам, как высокая скорость изменения или большое разнообразие подтипов, включая символьные, реляционные данные. В основе систематизации данных и извлечения скрытых закономерностей лежат следующие общеизвестные алгоритмы и технологии [2]:

- поиск и извлечение информации из новых источников;
- представление информации и знаний на ее основе;
- преобразование в единый формат;
- запись по центрам с релевантным содержимым.

Достаточно часто data-центры выполняют функции интеллектуальных хранилищ, обеспечивая ряд функций баз знаний по выявлению, прежде всего, поверхностных знаний, ряда закономерностей, которые в дальнейшем могут стать основой моделей представления знаний и метаданных [4]. Повторяя некоторые когнитивные функции человека, совмещение принципов обработки и хранения позволяет получить новое эмерджентное качество – воспроизводство объема информации без потерь содержания [5].

Первыми клиентами централизованной обработки, хранения и распространения информации были предприятия отрасли телекоммуникаций, электроэнергетики [6]. Также выделяются компании нефтяной и газовой сферы, банковские учреждения, службы информационно-рыночных площадок и другие потребители, активно использующие в своей деятельности информационные технологии [7]. Наиболее продвинутыми областями применения информационных технологий, технологий искусственного интеллекта всегда были высокодоходные, конкурентные области, области с критически распределяемым ресурсом, например электроэнергетика, коммерческий транспорт и др. [8]. С

течением времени data-центры приобрели большую популярность в традиционно плановых областях: образование, культура, медицина, органы государственной власти, что позволил систематизировать и поднять уровень выполняемых процессов [9]. Компании генерируют большое количество информации, которая при обработке, в т. ч. методами обработки знаний, будет полезна для смежных бизнес-процессов и получения прибыли [10].

Современный источник децентрализованного использования ИТ-ресурсов – активное распространение «облачных технологий» и использование коллективного хранилища для сбора, накопления и обработки удаленно расположенных данных [11]. Децентрализованный доступ к ИТ-ресурсам основан на автономной обработке копий данных и синхронизации полученных решений в соответствии с общим управляющим алгоритмом работы сети центров [12].

Тем не менее принципы общей архитектуры и организации работы сети разнотипных data-центров пока полностью не проработаны. Открытыми являются вопросы совместимости и открытости данных, корректности и релевантности их обработки. В связи с этим общие вопросы организации процессов в data-центрах являются актуальными.

Применительно к data-центру, схема традиционного информационно-управляющего цикла обработки информации имеет следующий вид (рис. 1). В ней обработка информации носит

однонаправленный характер. При этом стадии цикла преобразования и получения информации более высоких форм и видов никак не связаны с начальными

стадиями цикла, что не позволяет вести интенсивную обработку информации в пределах одной итерации.

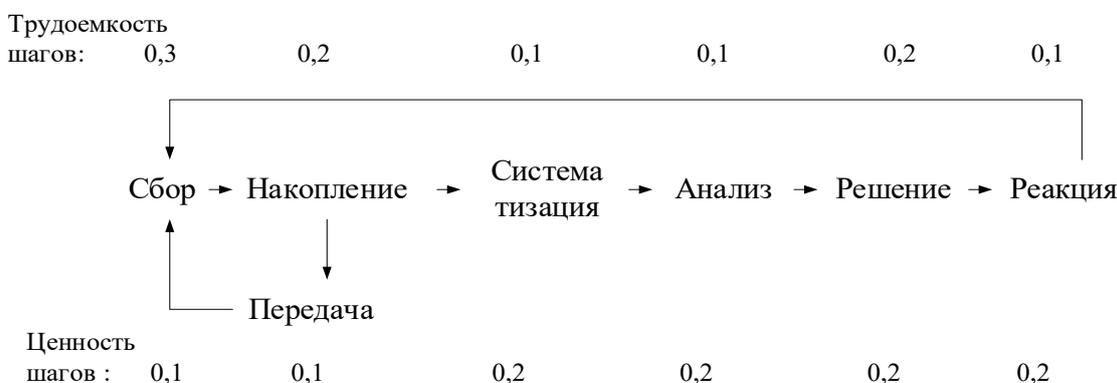


Рис. 1. Типовой информационно-управляющий цикл обработки информации

Fig. 1. Typical information and command cycle of data processing

Особенность данного цикла связана с введением по его шагам нормированных весов трудоемкости (Tr) и ценности ($Cost$) информации, которые могут иметь взаимно противоположные зависимости.

Применение моделей обработки знаний и создание сетевой инфраструктуры data-центров позволяет уменьшить стоимость владения информационными ресурсами за счет реализации межсетевых обменов и потоков информации между хранилищами как особый вид взаимодействия центров [13].

Такой подход, конечно, усложняет схему обработки информации. Тем не менее он позволяет снизить общую стоимость владения информационным ресурсом за счет добавления новых сведений без трудозатратных шагов первичного сбора, накопления информации.

Тогда для сети Data-центров целесообразно получить такой вид цикла и его

аппаратно-программный облик, чтобы функция $f(Tr, Cost)$ владения информацией имела вид

$$f(Tr, Cost) \rightarrow \min \quad (1)$$

Материалы и методы

В настоящее время актуальными являются требования по проектированию облика ИТ-инфраструктуры таким образом, чтобы одновременно обеспечить необходимую производительность и гибкость data-центров (функциональная эффективность) наряду с обеспечением требований по стабильности, надежности работы. Это требует выработки такого облика ИТ-инфраструктуры, которая бы позволила решать следующие задачи [14]:

- внедрение единой стратегии развития ИТ-инфраструктуры;
- интеграция и оптимизация информационных систем;

- обеспечение бесперебойности получения и передачи информации;
- реализация поисково-аналитических действий в фоновом режиме;
- беззапросная (по ретроспективе) подготовка информации.

Концепция развития ИТ-инфраструктуры базируется на основе анализа концепций ведущих производителями аппаратного и программного обеспечения (Hewlett-Packard – Adaptive Enterprise, SUN – SUN Reference Architectures, Microsoft – Microsoft Net System Architecture, ORACLE – Grid Computing) [15]. Эти концепции объединяет идеология реконфигурируемой архитектуры, способной связать основные бизнес-процессы с обеспечивающими процессами в зависимости от пропорций информации между стадиями обработки в цикла (рис. 1). При такой реализации реконфигурируемая архитектура предполагает также реализацию следующих опций [16]:

- динамическая оптимизация ресурса – способность ресурса гибко реагировать на изменение приоритетности поступающих задач и процессов для выполнения нескольких, разнородных функций;
- автоматизированное и интеллектуальное управление – необходимая инфраструктура для автоматического управления, диагностики и реагирования на изменение требований обработки в data-центрах;
- самодиагностика и автоматическое изменение связей, коррекция ошибочных действий.

Основными правилами адаптации сети Data-центров являются упрощение, стандартизация, модульность, интеграция [17].

Упрощенные приложения (рис. 2) более легко адаптировать, их проще использовать, соединять и модифицировать. Один из подходов – консолидация ресурсов. В дополнение к простоте управления, уменьшение количества серверов также сокращает время, необходимое на создание резервных копий, восстановление информации и, как следствие, время простоя. Другими словами, стоимость владения упрощенными приложениями меньше в сравнении с традиционными приложениями.

Стандартные приложения могут применяться к различным процессам, процедурам, технологиям и приложениям. Стандартизация ИТ-инфраструктуры достигается следующими способами:

- использованием промышленно-стандартизованных интерфейсов, платформ и методов разработки программного обеспечения;
- созданием общих процессов и политики для управления изменениями;
- синхронизацией ИТ-приложений с заданными потребностями бизнес-процессов;
- поддержкой и совместимостью с имеющимися технологиями и компонентами;
- определением общих требований к системам и алгоритмам управления, безопасности, конфигурации и др.



Рис. 2. Основные правила работы сети data-центров

Fig. 2. Basic rules for the operation of a network of data centers

В общем случае модульное построение сети системы позволяет изменять один из ее компонентов, не влияя на другие. Модульность достигается одним из способов:

– группировкой системы по признаку целевых задач;

– построением систем таким образом, чтобы они могли соединяться или разъединяться практически в реальном времени;

– возможностью изменения любой группы, конфигурации или компоненты без влияния на другие элементы системы.

Интеграция облегчает внесение изменений благодаря единообразной среде, упрощающей понимание, управление и модификацию.

Вышеперечисленные принципы (упрощение, стандартизация, модульность, интеграция) позволяют получить выгоды, направленные на последующую оценку трудоемкости и важности (ценности) шагов обработки информации. Они позволяют объединить в рамках единой архитектуры базовые свойства интеллектуальных (когнитивных) и вычислительных (преобразующих) процессов (рис. 3).

Как желаемый итог реконфигурируемая архитектура имеет иерархический вид (рис. 4), в котором каждый последующий уровень обеспечивает уменьшение стоимости владения информацией за счет ее тиражирования, воссоздания и генерации новой информации из уже имеющейся.

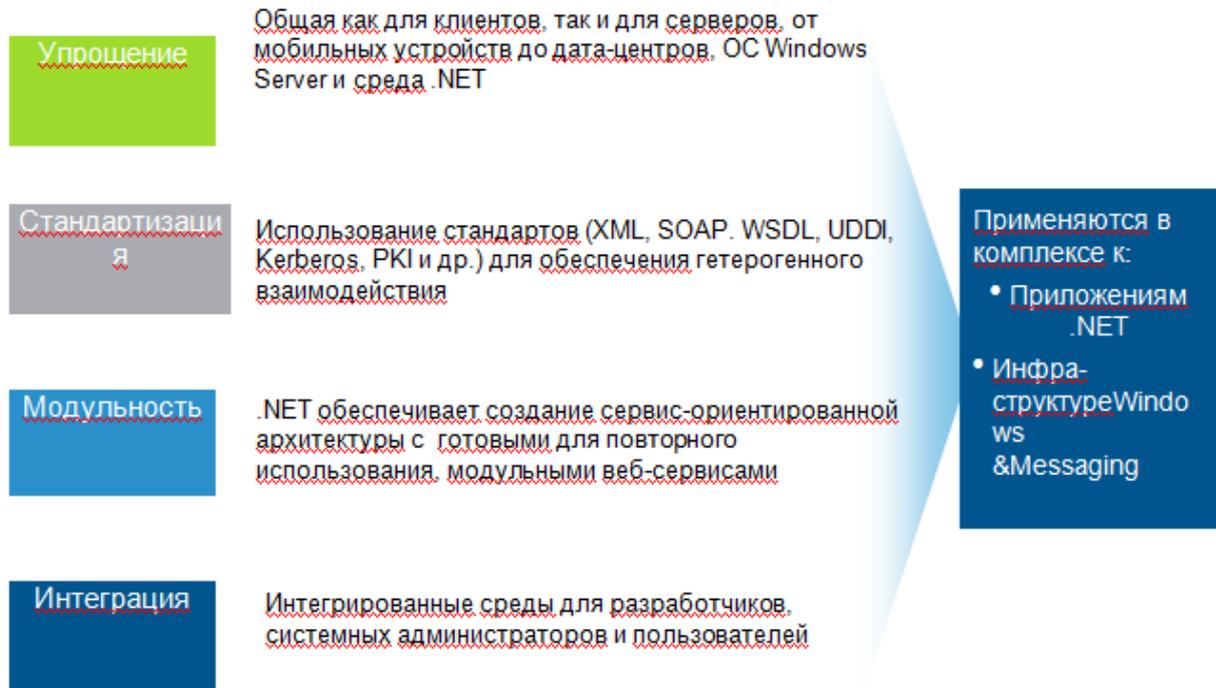


Рис. 3. Структурная схема объединения интеллектуальных и вычислительных процессов

Fig. 3. Structural diagram of the join of intellectual and computational processes

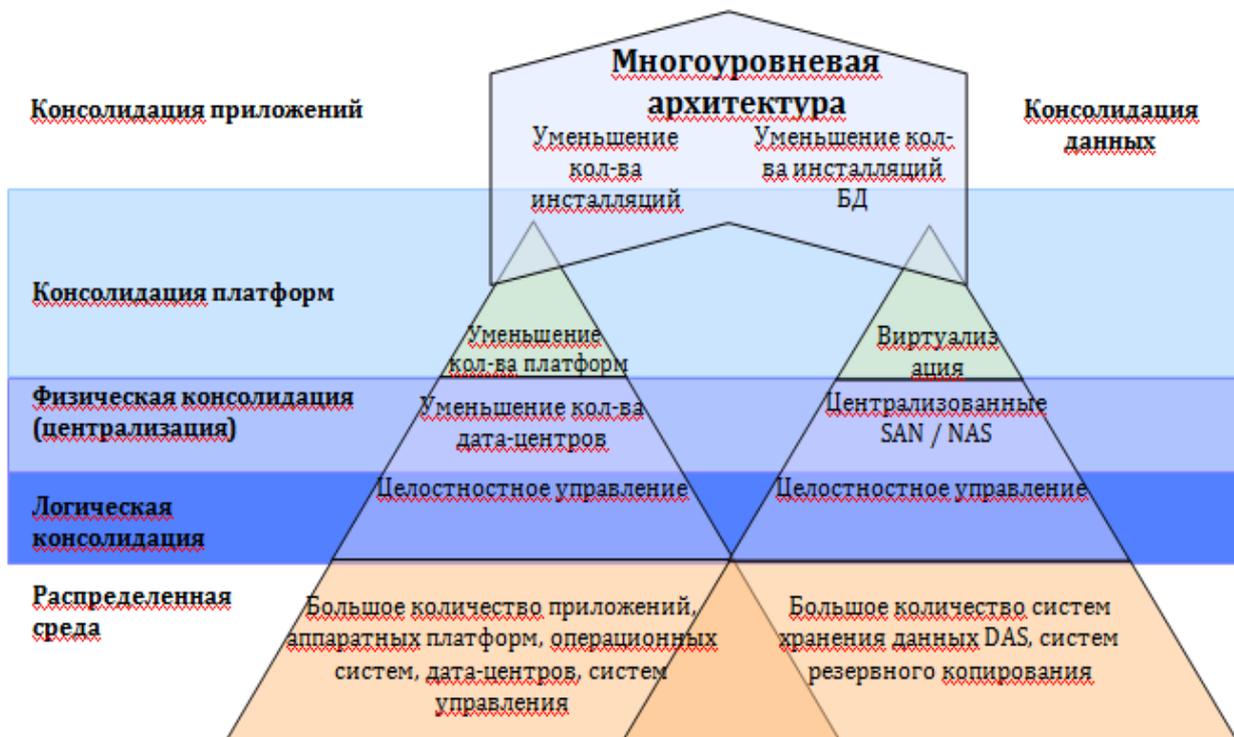


Рис. 4. Иерархия инфраструктурных средств в архитектуре сети центров

Fig. 4. Hierarchy of infrastructure solutions in the architecture of the network of centers

Такой подход к созданию облика перспективной реконфигурируемой архитектуры сети data-центров позволяет получить практико-ориентированную

схему поступления и обработки сетевых запросов с учетом возможности введения дополнительных бизнес-процессов по обработке информации (рис. 5).



Рис. 5. Многоуровневая структура приложений в составе data-центра

Fig. 5. Multi-level structure of applications within the data Center

Результаты и их обсуждение

На основе полученных решений по организации data-центров создан модифицированный информационно-управляющий цикл обработки информации. Он представляется как разветвленная последовательность (сеть) шагов, отличающаяся двунаправленным характером продвижения информации и возможностью многократного ее перетока между шагами обработки и избирательного объединения порций информации, что позволяет увеличить в пределах

текущей итерации объем циркулирующей информации. Данный подход к увеличению интенсивности обработки данных используется также в сетевых моделях обучения, позволяющих совместить шаги выборки и анализа [18].

На рисунке 6 показаны относительные веса шагов обработки, что свидетельствует об уменьшении стоимости владения информацией, под которой понимается взвешенное отношение входной и выходной информации к общему объему обрабатываемой информации.

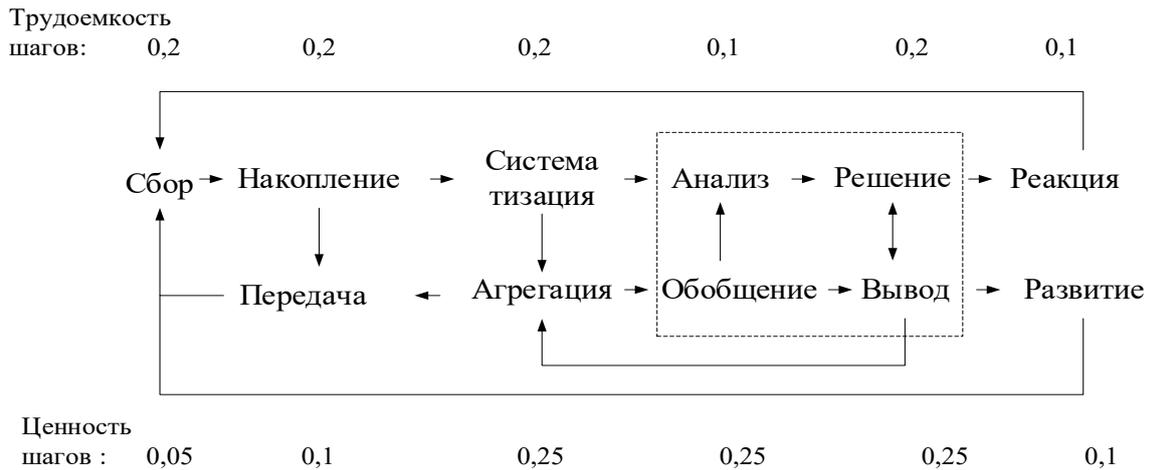


Рис. 6. Модифицированный информационно-управляющий цикл обработки информации

Fig. 6. Modified information management information processing cycle

Оценка сложности организации сети выполняется на основе ее общих характеристик в виде

$$k = \frac{V_{TOTAL} \cdot E_{TOTAL}}{N_{TOTAL}}, \quad (2)$$

где V_{TOTAL} – общее число вершин в сети; E_{TOTAL} – общее число дуг в сети; N_{TOTAL} – общее число уровней в сети.

Тем не менее выражение (2) через число вершин-дуг, приходящихся на один уровень, дает количественную оценку сложности сети, оставляя в стороне структурные свойства сети. Для расширенной оценки циклов обработки информации (учет отношений следования, связности, ветвления и др.) использованы следующие показатели сложности и связности в моделях семантические сети или нейронные сети (при обучении) [19; 20]:

- средний коэффициент ветвления сети KV (число вершин-потомков без повторов, приходящихся на один уровень);

- средний коэффициент связности сети KL (число вершин-родителей, приходящихся на один уровень);

- средний коэффициент следования KS (число внутренних вершин, приходящихся на один уровень);

- относительный коэффициент ветвления сети KV' (число потомков относительно общего числа вершин);

- относительный коэффициент связности сети KL' (число родителей относительно общего числа вершин);

- относительный коэффициент следования KS' (число внутренних вершин относительно общего числа вершин);

- относительный коэффициент путей S , приходящихся на одну дугу.

Входными значениями для оценки графов выступают показатели:

- входные, выходные, внутренние дуги $E_{IN}, E_{OUT}, E_{INSIDE}$;

- вершины-родители, вершины-потомки V_{MAIN}, V_{CHILD} ;

- количество путей S .

Средний коэффициент ветвления вычисляется как

$$KV = \frac{\sum_{f=1}^{N_{TOTAL}} V_{CHLD_f}}{N_{TOTAL}}. \quad (3)$$

Средний коэффициент связности вычисляется как

$$KL = \frac{\sum_{f=1}^{N_{TOTAL}} V_{MAIN_f}}{N_{TOTAL}}. \quad (4)$$

Средний коэффициент следования вычисляется как

$$KS = \frac{\sum_{f=1}^{N_{TOTAL}} V_{MIDL_f}}{N_{TOTAL}}. \quad (5)$$

Относительный коэффициент ветвления вычисляется как

$$KV' = \frac{V_{CHLD}}{V_{TOTAL}}. \quad (6)$$

Относительный коэффициент связности вычисляется как

$$KL' = \frac{V_{MAIN}}{V_{TOTAL}}. \quad (7)$$

Относительный коэффициент следования вычисляется как

$$KS' = \frac{V_{MIDL}}{V_{TOTAL}}. \quad (8)$$

Относительный коэффициент путей определяется как отношение общего количества путей S в сети к общему числу дуг E_{TOTAL} в сети:

$$TR = \frac{S}{E_{TOTAL}}. \quad (9)$$

Для оценки сложности и связности шагов циклов в пределах одной итерации построены неориентированные графы (рис. 7), соответствующие информационно-управляющим циклам на рисунках 1 и 6, где 1-11 – вершины, отвечающие шагам обработки информации.

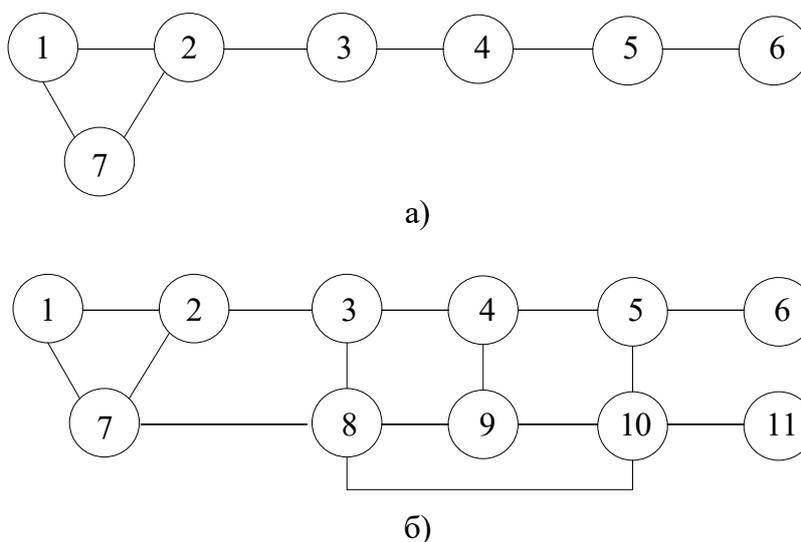


Рис. 7. Графы, соответствующие информационно-управляющим циклам:
а – граф для стандартного информационно-управляющего цикла;
б – граф для модифицированного информационно-управляющего цикла

Fig. 7. Graphs corresponding to information control cycles: а – graph for the standard information control cycle; б – graph for the modified information control cycle

В таблицах 1 и 2 даны исходные характеристики графов и рассчитанные по ним показатели. Сравнение рассчитанных выходных показателей по стандартному и модифицированному циклам обосновывает поддержку таких структурных возможностей, как связность, ветвление, следование элементов

данных, моделирующих когнитивные возможности человека при обработке большого объема неструктурированных данных (декомпозиция, агрегация, анализ, обобщение), используемых в различных моделях и средствах представления и обработки знаний для организаций различных отраслей [21; 22].

Таблица 1. Исходные характеристики графов (число вершин, связей, уровней)

Table 1. Input characteristics of graphs (number of nodes, connections, levels)

Количественные характеристики графов	Граф-1		Граф-2	
V_{TOTAL}	7		11	
E_{TOTAL}	7		15	
N_{TOTAL}	6		6	
k		8,17		27,5
V_{MAIN}	6		12	
V_{CHILD}	7		14	
V_{MIDL}	5		8	
S	3		15	

Таблица 2. Рассчитанные показатели сложности

Table 2. Calculated complexity indicators

Структурные показатели графов	Граф-1	Граф-2
Средний коэфф. ветвления KV	1,17	1,36
Средний коэфф. связности KL	1,00	1,12
Средний коэфф. следования KS	0,66	0,82
Общий средний (арифметическое)	0,94	1,1
Относительный коэфф. ветвления KV'	1,00	1,27
Относительный коэфф. связности KL'	0,86	1,09
Относительный коэфф. следования KS'	0,71	0,72
Относительный коэфф. путей TR	0,43	1,00
Общий относительный (арифметическое)	0,75	1,02

Построенный модифицированный информационно-управляющий цикл обработки информации в data-центрах имеет более высокий средний показатель (увеличение в 1,17 раза) и

относительный показатель (увеличение в 1,36 раза), что обосновывает эффективность объединения шагов систематизации, анализа и обобщения в ходе многократной обработки данных.

Выводы

Анализ вариантов организации data-центров показал, что перспективной архитектурой выступает сетевая архитектура, использующая «облачные технологии» и отличающаяся адаптацией состава и межэлементных коммуникаций под особенности предметной области.

Способность совмещения шагов хранения, обработки информации и выделения новых закономерностей позволяет

трактовать современные data-центры как интеллектуальные сетевые хранилища-поисковики. Созданный модифицированный информационно-управляющий цикл предписывает многократно выполнять стадии систематизации, обобщения, анализа данных для получения новых форм представления или новых порций информации, что обеспечивает повышение общей производительности и снижение стоимости владения коллективными информационными ресурсами.

Список литературы

1. Elistratova I. B., Pikuzo N. G. Distributed storage systems in data centers // *Science and Business: Ways of Development*. 2024. N 4(154). P. 19–23.
2. Большие данные в области электроэнергетики / О. А. Засухина, Е. В. Ершов, Л. К. Головатюков, Г. А. Шитенков // *Вестник Ангарского государственного технического университета*. 2022. № 16. С. 16–20.
3. Концепция экспертной системы предиктивного анализа работоспособности энергогенерирующего оборудования / Н. В. Крупенин, И. Е. Кудрявцев, В. Н. Крупенин, Р. Н. Поляков // *Автоматизация и ИТ в энергетике*. 2020. № 9(134). С. 14–16.
4. Модели представления и обработки знаний в информационно-аналитических системах / В. П. Добрица, Е. А. Титенко, Ю. А. Халин, А. И. Катыхин. Курск: Университетская книга, 2023. 172 с.
5. Лавриченко О. В. Когнитивное моделирование на базе неманипулируемых механизмов принятия управленческих решений // *Системный анализ и прикладная информатика*. 2015. № 4. С. 45–48.
6. Какурина А. В., Сизов А. С., Халин Ю. А. Когнитивное моделирование и прогнозирование потребления электроэнергии // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2023. Т. 27, № 4. С. 44–61. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-44-61>
7. Еремин Н. А., Степанян А. А., Столяров В. Е. Управление нефтегазовыми активами в эпоху технологий хранения и обработки больших массивов данных // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. 2019. № 12(557). С. 5–14.
8. Костарев В. Ростелеком представил основные подходы к разработке стратегии цифровой трансформации компании // *Фотон-экспресс*. 2019. № 1(153). С. 6–7.

9. Ларина А. К., Григорян А. А. Состояние и перспективы развития российских центров обработки в рамках инфраструктуры программы «Цифровая экономика» // Экономика и бизнес: теория и практика. 2018. № 4. С. 146–149.

10. Еремин Н. А., Селенгинский Д. А. О возможностях применения методов искусственного интеллекта в решении нефтегазовых задач // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. № 1. С. 201–211.

11. Мельник Э. В., Клименко А. Б. Применение концепции «Туманных» вычислений при проектировании высоконадежных информационно-управляющих систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 2. С. 273–283.

12. Организация эффективного сетевого доступа к ресурсам дата-центра в распределённой инфокоммуникационной инфраструктуре / М. Р. Биктимиров, А. Б. Жижченко, А. П. Овсянников [и др.] // Механика, управление и информатика. 2014. Т. 6, № 6(51). С. 33–40.

13. Usmandilawar M., Syed F. Mathematical Modeling and Analysis of Network Service Failure in DataCentre // International Journal of Modern Education and Computer Science. 2014. Vol. 6, N 6. P. 30–36. <https://doi.org/10.5815/ijmecs.2014.06.04>

14. Соловьев А. Энергоэффективность: методы оптимизации инженерной инфраструктуры // Технологии и средства связи. 2012. № 4. URL: <http://lib.tssonline.ru/articles2/fix-corp/energoeffektivnost-metody-optimizatsii-inzhenernoy-infrastruktury/> (дата обращения: 19.09.2024)

15. Догучаева С. М. Динамика развития российского рынка облачных технологий и больших данных // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. 2023. № 1. С. 79–82.

16. Веселицкий О. И. Центры обработки данных-зеленый вектор развития цифровой экономики // Инновации и инвестиции. 2018. № 4. С. 214–220.

17. Судани Х. Х. Отказоустойчивость и безопасность доступа в облачных вычислениях // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 4(94). С. 115–119.

18. Формирование системы комплексного оценивания на основе обучающих вариантов / И. В. Буркова, В. Н. Бурков, О. Г. Добросердов [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 4(33). С. 126–138.

19. Анализ стратегий игровых пространств с использованием нейронных сетей / Р. А. Томакова, В. В. Джабраилов, М. В. Томаков [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 2. С. 51–65.

20. Халин Ю. А., Киселева К. А., Альков В. В. Модель информационного взаимодействия конкурирующих предприятий // Известия Юго-Западного государственного

университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2017. Т. 7, № 3(24). С. 29–35.

22. Melnik E. V., Orda-Zhigulina M. V., Orda-Zhigulina D. V. Distributed Library Model Based on Distributed Ledger Technology for Monitoring and Diagnostics System // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Vol. 230. P. 501–509.

21. Метод построения нечеткой когнитивной карты конкурентоспособности машиностроительного предприятия / И. А. Буйневич, Ю. А. Криушина, Ю. А. Халин [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 3. С. 146–163.

References

1. Elistratova I.B., Pikuzo N.G. Distributed storage systems in data centers. *Science and Business: Ways of Development*. 2024;(4):19–23.

2. Zasukhina O.A., Ershov E.V., Golovatyukov L.K., Shitenkov G.A. Big data in the field of electric power industry. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Angarsk State Technical University*. 2022;(16):16–20. (In Russ.)

3. Krupenin N.V., Kudryavtsev I.E., Krupinin V.N., Polyakov R.N. The concept of an expert system for predictive analysis of the operability of energy generating equipment. *Avtomatizatsiya i IT v energetike = Automation and IT in the Energy Sector*. 2020;(9):14–16. (In Russ.)

4. Dobritsa V.P., Titenko E.A., Khalin Y.A., Katykhin A.I. Models of knowledge representation and processing in information and analytical systems. Kursk: Universitetskaya kniga; 2023. 172 p.

5. Lavrichenko O.V. Cognitive modeling based on non-manipulated mechanisms of managerial decision-making. *Sistemnyi analiz i prikladnaya informatika = System Analysis and Applied Informatics*. 2015;(4):45–48. (In Russ.)

6. Kakurina A.V., Sizov A.S., Khalin Y.A. Cognitive modeling and forecasting of electricity consumption. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023;27(4):44–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-44-61>

7. Eremin N.A., Stepanyan A.A., Stolyarov V.E. Management of oil and gas assets in the era of technologies for storing and processing large amounts of data. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoi promyshlennosti = Automation, Telemechanization and Communications in the Oil Industry*. 2019;(12):5–14. (In Russ.)

8. Kostarev V. Rostelecom presented the main approaches to the development of the company's digital transformation strategy. *Foton-ekspress = Photon-Express*. 2019;(1):6–7. (In Russ.)

9. Larina A.K., Grigoryan A.A. The state and prospects of development of Russian processing centers within the framework of the infrastructure of the Digital Economy program. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika = Economics and Business: Theory and Practice*. 2018;(4):146–149. (In Russ.)

10. Eremin N.A., Selenginsky D.A. On the possibilities of using artificial intelligence methods in solving oil and gas problems. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = Izvestiya Tula State University. Sciences of Earth*. 2023;(1):201–211. (In Russ.)

11. Melnik E.V., Klimenko A.B. Application of the concept of "Foggy" calculations in the design of highly reliable information and control systems. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = Izvestiya Tula State University. Sciences of Earth*. 2020;(2):273–283. (In Russ.)

12. Biktimirov M.R., Zhizhchenko A.B., Ovsyannikov A.P., et al. Organization of effective network access to data center resources in a distributed infocommunication infrastructure. *Mekhanika, upravlenie i informatika = Mechanics, Management and Informatics*. 2014;(6):33–40. (In Russ.)

13. Usmandilawar M., Syed F. Mathematical Modeling and Analysis of Network Service Failure in DataCentre. *International Journal of Modern Education and Computer Science*. 2014; 6(6):30–36. <https://doi.org/10.5815/ijmecs.2014.06.04>

14. Soloviev A. Energy efficiency: methods of optimization of engineering infrastructure. *Tekhnologii i sredstva svyazi = Technologies and Means of Communication*. 2012;(4). Available at: <http://lib.tssonline.ru/articles2/fix-corp/energoeffektivnost-metody-optimizatsii-inzhenernoy-infrastruktury> (accessed 19. 09.2024).

15. Doguchaeva S.M. Dynamics of development of the Russian market of cloud technologies and big data. *RISK: Resursy, Informatsiya, Snabzhenie, Konkurentsia = RISK: Resources, Information, Supply, Competition*. 2023;(1):79–82. (In Russ.)

16. Veselitskiy O.I. Data processing centers – a green vector of digital economy development. *Innovatsii i investitsii = Innovations and Investments*. 2018;(4):214–220. (In Russ.)

17. Sudani H.H. Fault tolerance and access security in cloud computing. *Nauka i biznes: puti razvitiya = Science and Business: Ways of Development*. 2019;(4):115–119. (In Russ.)

18. Burkova I.V., Burkov V.N., Dobroserdov O.G., et al. Formation of a comprehensive assessment system based on educational options. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2019;9(4):126–138. (In Russ.)

19. Tomakova R.A., Dzhabrailov V.V., Tomakov M.V., et al. Analysis of game space strategies using neural networks. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2021;11(2):51–65. (In Russ.)
20. Khalin Y.A., Kiseleva K.A., Alcove V.V. Model of information interaction of competing enterprises. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2017;7(3):29–35. (In Russ.)
21. Buinevich I.A., Kriushina Y.A., Khalin Y.A., et al. Method of constructing a fuzzy cognitive map of the competitiveness of a machine-building enterprise. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;13(3):146–163. (In Russ.)
22. Melnik E.V., Orda-Zhigulina M.V., Orda-Zhigulina D.V. Distributed Library Model Based on Distributed Ledger Technology for Monitoring and Diagnostics System. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021;230:501–509. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Сизов Александр Семенович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программ инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sizov1942@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8110-9929

Alexander S. Sizov, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Professor of the Department of Engineering Program, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sizov1942@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8110-9929

Титенко Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программ инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: johntit@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5659-4747

Evgeny A. Titenko, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Program Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: johntit@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5659-4747

Халин Юрий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: yur-khalin@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-7020-8515

Yuri A. Khalin, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engineering Program, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: yur-khalin@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-7020-8515

Титенко Михаил Андреевич, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mikhail-titenko@mail.ru, ORCID: 0009-0008-1560-5594

Mikhail A. Titenko, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mikhail-titenko@mail.ru, ORCID: 0009-0008-1560-5594

Калинин Роман Викторович, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: k.uldir@yandex.ru, ORCID: 0009-0007-4745-7357

Roman V. Kalinin, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: k.uldir@yandex.ru, ORCID: 0009-0007-4745-7357

МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-164-180>



УДК 621.391.26

Нечеткие модели для оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы у инженерно-технического персонала

Н. А. Корневский¹, Р. И. Сафронов², О. Ю. Лукаш¹,
С. Н. Родионова¹, Г. В. Сипливый³, В. В. Аксёнов¹ ✉

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

² Курский государственный аграрный университет имени И. И. Иванова
ул. К. Маркса, д. 70, г. Курск 305021, Российская Федерация

³ Курский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. К. Маркса, д. 3, г. Курск 305021, Российская Федерация

✉ e-mail: aksenchik777@gmail.com

Резюме

Целью исследования является разработка метода оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы, позволяющего обеспечить повышение качества принимаемых решений в задачах прогнозирования и диагностики заболеваний, характерных для инженерно-технического персонала.

Методы. Показано, что адаптационный потенциал представляют собой нечеткую переменную, описываемую в рамках классической теории нечеткой логики. В рамках этой методологии для синтеза решающих правил оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы вводятся нормирующие функции уровня адаптации для показателей, выбираемых из набора тестовых методик, описывающих состояние исследуемой системы, которые агрегируются в искомую гибридную нечеткую модель. Учитывая, что инженерный труд часто сопровождается высоким уровнем психоэмоционального напряжения и утомления, для оценки состояния центральной нервной системы выбран прибор контроля функций внимания и памяти, позволяющий сформировать необходимый для решения поставленных задач объем исходных данных.

Результаты. В ходе проведенных исследований для синтеза решающих правил оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы, с учетом специфики труда инженерно-технических работников был сформирован набор информативных признаков: уровень личной и ситуативной тревожности, концентрированность внимания и показатель, характеризующий состояние блоков оперативной памяти, вычисляемый по методике определения отсутствующей цифры. Для этого набора показателей были получены соответствующие нормирующие функции уровня адаптации, агрегация которых дает искомую нечеткую математическую модель оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы.

© Корневский Н. А., Сафронов Р. И., Лукаш О. Ю., Родионова С. Н., Сипливый Г. В., Аксёнов В. В., 2024

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление,
вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024;14(4):164–180

Заключение. В ходе проведенных исследований был разработан метод оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы и получена соответствующая нечеткая модель оценки уровня этого потенциала с ориентацией на особенности труда инженерно-технических работников. В ходе экспертного оценивания и математического моделирования было показано, что уверенность в правильной оценке уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы превышает величину 0,9.

Ключевые слова: адаптационный потенциал; центральная нервная система; инженерно-технический персонал; математические модели; нечеткие решающие правила.

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

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

Для цитирования: Нечеткие модели для оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы у инженерно-технического персонала / Н. А. Корневский, Р. И. Сафронов, О. Ю. Лукаш, С. Н. Родионова, Г. В. Сипливый, В. В. Аксёнов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 4. С. 164–180. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-164-180>

Поступила в редакцию 10.10.2024

Подписана в печать 08.11.2024

Опубликована 27.12.2024

Fuzzy models for assessing the level of adaptive potential of the central nervous system in engineering and technical personnel

Nikolay A. Korenevsky¹, Ruslan I. Safronov², Olesya Y. Lukash¹, Sofya N. Rodionova¹, Gennady V. Siplivy³, Vitaly V. Aksenov¹ ✉

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

² Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov
70 K. Marx Str., Kursk 305021, Russian Federation

³ Kursk State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation
3 K. Marx Str., Kursk 305021, Russian Federation

✉ e-mail: aksenchik777@gmail.com

Abstract

The purpose of the research is to develop a method for assessing the level of adaptive potential of the central nervous system, which allows improving the quality of decisions made in the tasks of forecasting and diagnosing diseases characteristic of engineering and technical personnel.

Methods. It is shown that the adaptive potential is a fuzzy variable described in the framework of the classical theory of fuzzy logic. Within the framework of this methodology, for the synthesis of decisive rules for assessing the level of adaptive potential of the central nervous system, normalizing functions of the level of adaptation are introduced for indicators selected from a set of test methods describing the state of the system under study, which are aggregated into the desired hybrid fuzzy model. Considering that engineering work is often accompanied by a high level of psychoemotional stress and mental fatigue, a device for monitoring the functions of attention and memory was chosen to

assess the state of the central nervous system, which allows forming the volume of initial data necessary to solve the tasks.

Results. In the course of the conducted research, to synthesize the decisive rules for assessing the level of adaptive potential of the central nervous system, taking into account the specifics of the work of engineering and technical workers, a set of informative signs was formed consisting of the level of personal and situational anxiety, concentration of attention and an indicator characterizing the state of RAM blocks, calculated by the method of determining the missing digit. For this set of indicators, the corresponding normalizing functions of the level of adaptation were obtained, the aggregation of which gives the desired fuzzy mathematical model for assessing the level of adaptive potential of the central nervous system.

Conclusion. In the course of the conducted research, a method for assessing the level of adaptive potential of the central nervous system was developed and a corresponding fuzzy model for assessing the level of this potential was obtained, focusing on the peculiarities of the work of engineering and technical workers. During the expert assessment and mathematical modeling, it was shown that the confidence in the correct assessment of the level of adaptive potential of the central nervous system exceeds 0.9.

Keywords: adaptive potential; central nervous system; engineering and technical personnel; mathematical models; fuzzy decision rules.

Funding: The work was carried out within the framework of the Southwestern State University Development Program of the Priority 2030 project.

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

For citation: Korenevsky N.A., Safronov R.I., Lukash O.Y., Rodionova S.N., Siplivy G.V., Aksenov V.V. Fuzzy models for assessing the level of adaptive potential of the central nervous system in engineering and technical personnel. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2024;14(4):164–180. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-164-180>

Received 10.10.2024

Accepted 08.11.2024

Published 27.12.2024

Введение

Решаемые в работе задачи относятся к большой проблеме повышения надежности работы человеко-машинных систем и снижения риска появления и развития заболеваний, провоцируемых производственными факторами риска и, в частности, факторами, связанными с нагрузкой на головной мозг при творческой работе. В этой области опубликовано огромное число работ. Например, в работе [1, с. 232] описаны основные проблемы инженерной психологии, куда составной частью входят решаемые в работе задачи, а в работе [2, с. 153] показано влияние процессов проектирования

сложных человеко-машинных систем на психофизиологические характеристики операторов, в работе [3, с. 61] рассматриваются общие вопросы влияния человеко-машинных систем на производительность и здоровье работников, в [4, с. 79] получены математические модели оценки качества работы операторов в сложных человеко-машинных системах. В [5, с. 295] исследуется влияние сложных условий жизни и труда на когнитивные функции и нейрофизиологические процессы адаптации, в [6, с. 115] изучаются когнитивные эффекты умственного утомления, в [7, с. 582] решаются задачи классификации когнитивного

дефицита, а в [8, с. 244] исследуются вопросы когнитивных расстройств у пациентов умственного труда. В работе [9, с.58] изучается структура когнитивных нарушений у больных с непсихотическими депрессивными расстройствами, а работа [10, с. 33] исследует вопросы особенности работы оператора в интегрированных системах управления и т. д.

Анализ перечисленных и других работ, связанных с инженерным трудом, показал, что ряд инженерных профессий в процессе трудовой деятельности формирует состояние напряжения, а нередко и перенапряжения функционального состояния (ФС) организма, что провоцирует трудноразрешимые психологические состояния, приводящие к появлению и развитию пограничных психических расстройств, неврозов, заболеваний сердечно-сосудистой системы. Имеются работы, показывающие наличие высокой корреляционной связи между ухудшением функционального состояния центральной нервной системы (ЦНС) и развитием заболеваний нервной и сердечно-сосудистой систем [4 с. 87].

В работе [11, с. 188] было обосновано, что ФС человека и его систем тесно связано как с состоянием здоровья, так и с адаптационным потенциалом (АП), под которым в общем случае понимают показатель уровня приспособляемости организма человека к различным и меняющимся факторам внешней среды. Основоположник современной адаптологии Р. М. Баевский убедительно показал,

что показатель уровня АП является надежным предиктором при решении задач прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, вызываемых производственными факторами риска. С учетом этого в данной работе была поставлена задача разработки метода оценки АП ЦНС с получением соответствующих математических моделей с дальнейшим их использованием при построении решающих правил прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, провоцируемых особенностями инженерно-технических профессий.

С математической точки зрения решаемые в работе задачи относятся к классу плохоформализуемых задач, для решения которых разработано множество методов. Например, в работе [12, с. 115] показывается эффективность использования гибридных нечетких моделей при решении задач прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы, провоцируемых комбинированным воздействием разнородных факторов риска; в работе [13, с. 146] приводится описание использования моделей этого класса при решении задач прогнозирования, диагностики и оценки степени тяжести некоторых классов сердечно-сосудистых заболеваний; в работе [14, с. 140] показана эффективность применения гибридных нечетких моделей при прогнозировании и оценке степени тяжести ишемии сердца; в работе [15, с. 70] обсуждаются вопросы применимости слабых классификаторов для прогнозирования сердечно-сосудистых рисков;

в [16, с. 180] обсуждается применимость мультиагентной интеллектуальной системы для прогноза риска сердечно-сосудистых осложнений; в [17, 130] исследуется применимость моделей латентных предикторов в интеллектуальных системах прогнозирования состояния живых систем; в [18, с. 400] показываются перспективы использования гибридных нечетких технологий в медицинских исследованиях; в [19, с. 47] обсуждаются возможности искусственных нейронных сетей; в [20, с. 63] исследуются перспективы использования систем символьной обработки данных в медицинской практике и т. д.

В работе [11, с. 185] было показано, что АП представляют собой нечеткую лингвистическую переменную, описываемую в рамках классической теории нечеткой логики, являющейся разновидностью технологии мягких вычислений. Анализ структуры классов, принятых в адаптации, и методов решения аналогичных задач показал, что из множества методов, моделей и алгоритмов, принятых в технологии мягких вычислений, целесообразно использовать методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), разработанную в Юго-Западном государственном университете [18, с. 350]. В рамках этой методологии интеллектуальные возможности экспертов клиницистов и инженеров когнитологов объединяются с методами искусственного интеллекта, что позволяет работать с классами плохо-формализуемых задач. В качестве

основных элементов МСГНРП используются функции принадлежности $\mu_{\omega_\ell}(x_i)$ к гипотезам (классам) ω_ℓ , а в качестве базовых переменных наиболее часто выбираются информативные признаки, комплексные показатели, характеризующие объекты исследования, коэффициенты уверенности KU_{ω_ℓ} (по событиям ω_ℓ и т. д.).

Материалы и методы

С учетом специфики решаемой задачи и рекомендаций работы [3, с. 60] для синтеза решающих правил оценки уровня АП ЦНС дополнительно к функциям принадлежности вводятся нормирующие функции уровня адаптации (ФУА) ЦНС $f_{\text{ц}j}(s)$, где j – идентификатор используемых для оценки АП методик оценки состояния ЦНС, s – идентификатор измерительной шкалы. Область значений этих функций определена на интервале $[0, \dots, 1]$. Нулевому значению ФУА соответствует слом адаптивных механизмов. Единичное значение ФУА определяет такой уровень АП, который позволяет сохранить здоровье и работоспособность организма с требуемым качеством при заданных рабочих нагрузках. Если АП ЦНС определяется по нескольким показателям, то в рамках МСГНРП предлагается один из трех способов агрегации $f_{\text{ц}j}(s)$.

Если отобранные показатели удовлетворяют свойствам модели Э. Шортлифа, то используется агрегатор типа [18, с. 381]:

$$UAP_{цj}(s+1) = UAP_{цj}(s) + f_{цj}(Q_{s+1})[1 - UAP_{цj}(s)], \quad (1)$$

где $j = 1, \dots, J$; $s = 1, \dots, S$; $UAP_{цj}(1) + f_{цj}(Q_1)$.

Если эксперты считают возможным принимать решение по той составляющей уровня адаптации, которая принимает максимальное значение, с возможным игнорированием «слабого звена», используют агрегатор типа [18, с. 381]:

$$UAP_{цj} = \max[f_{цj}(Q_s)]. \quad (2)$$

Если эксперты при синтезе решающих правил ориентируются в оценке уровня адаптации всего организма на самое «слабое звено» адаптации, следует использовать агрегатор вида [18, с. 381]:

$$UAP_{цj} = \min[f_{цj}(Q_s)]. \quad (3)$$

Известно, что инженерный труд часто сопровождается высоким уровнем психоэмоционального напряжения и умственного утомления с преобладающей нагрузкой на когнитивные функции внимания и памяти. Проведенные исследования показали, что в этих условиях для оценки состояния ЦНС целесообразно использовать прибор контроля функций внимания и памяти (ПКФ-ВП) [21, с. 88], пример эффективного практического использования описан в работе [22, с. 88].

С учетом общих рекомендаций МСГНРП и особенностей решаемой задачи нами был разработан метод синтеза моделей оценки адаптационного потенциала центральной нервной системы, состоящий из следующей последовательности действий.

1. Инженер по знаниям, владеющий МСГНРП, формирует группу экспертов психологов, имеющих дополнительную подготовку по адапталоги. С учетом рекомендаций работ [11, с. 187] в качестве базового элемента искомых моделей выбираются нормирующие функции уровня адаптации ЦНС $f_{цj}(s)$.

2. Составляется список тестовых опросников, используемых для оценки уровня адаптации ЦНС, и производится их оптимизация с учетом нечеткой структуры данных с получением списка информативных показателей $T_{цтj}$.

3. Производится синтез нормирующих функций уровня адаптации ЦНС $f_{цтj}(T_{цтj})$. С учетом экспертного анализа роли информативных тестовых опросников в общей оценке уровня АП ЦНС выбирается тип функции агрегации $AG_{цтj}$ из набора моделей (1), (2) или (3) и осуществляется синтез частного решающего правила вида

$$UAP_{цт} = AG_{цтj}[f_{цтj}(T_{цтj})]. \quad (4)$$

4. С использованием метода комплексной оценки уровня информативности классификационных признаков в условиях нечеткой структуры данных или нечеткой модификации теории измерения латентных переменных с моделью Г. Раша производится оптимизация списка показателей, характеризующих состояния свойств внимания и памяти, определяемых с помощью ПКФ-ВП с выбором состава информативных показателей $S_{цсрj}$.

5. Синтезируются нормирующие функции уровня адаптации ЦНС $f_{цсрj}(S_{цсрj})$ по группе тестов типа «Сложная зрительно-моторная реакция» и аналогично п. 3, с учетом экспертного анализа роли информативных показателей внимания и оперативной памяти в общей оценке уровня АП получают частное решающее правило вида

$$UAP_{цср} = AG_{цсрj} [f_{цсрj}(S_{цсрj})]. \quad (5)$$

6. С учетом экспертного анализа роли $UAP_{цт}$ и $UAP_{цср}$ в общей оценке уровня АП ЦНС выбирается тип функции агрегации для финальной модели вида:

$$UAP_{цнс} = AG_{цнс} [UAP_{цт}, UAP_{цср}]. \quad (6)$$

Результаты и их обсуждение

В соответствии с описанным выше методом на первом этапе синтеза в качестве информативных тестовых опросников, используемых для оценки уровня адаптации ЦНС, были отобраны тесты Спилбергера-Ханина личностной тревожности (ЛТ) и ситуативной тревожности (СТ). При синтезе нормирующих функции уровня адаптации ЦНС $f_{цт}(ЛТ)$ $f_{цт}(СТ)$ необходимо учитывать, что значения ЛТ и СТ находятся в диапазоне от 20 до 80 баллов. Уровень ситуативной тревожности определяется в соответствии со следующими правилами:

$СТ \leq 30$ – низкий уровень ситуативной тревожности (СТ); $30 < СТ \leq 44$ – умеренный уровень СТ; $СТ \geq 45$ – высокий уровень СТ. По этому же алгоритму (с этими же диапазонами границ) оценивается уровень личностной тревожности.

Для построения графиков нормирующих функций привлекались эксперты имеющие компетенции в области адаптации и МСГНРП, которые отвечали на следующие вопросы. При каких значениях $ЛТ_{\min}$ и $СТ_{\min}$ нормирующие функции уровня адаптации ЦНС $f_{цт \min}(ЛТ)$ и $f_{цт \min}(СТ)$ имеют минимальные значения и каковы эти значения? При каких значениях $ЛТ_{\max}$ и $СТ_{\max}$ нормирующие функции уровня адаптации ЦНС $f_{цт \max}(ЛТ)$ и $f_{цт \max}(СТ)$ имеют максимальные значения и каковы эти значения? Какую геометрическую форму имеют линии связи между минимальными и максимальными значениями нормирующих функций уровня адаптации ЦНС?

Эксперты определили, что уровень доверия к оценке АП ЦНС с использованием тестов личной и ситуативной тревожности лежит в интервале от 0,4 до 0,5, что определило значения $f_{цт \max}(ЛТ)$ и $f_{цт \max}(СТ)$.

Рассмотрим результаты опроса экспертов по шкалам ЛТ и СТ (табл. 1 и 2).

Таблица 1. Результаты опроса экспертов для шкалы ЛТ

Table 1. Results of the expert survey for the LT scale

Граничный параметр	Эксперты							Среднее значение
	11	22	23	24	25	26	77	
$ЛТ_{min}$	30	30	25	30	25	30	30	30
$f_{цт min}(ЛТ)$	0,1	0,0	0,05	0,1	0,0	0,05	0,1	0,05
$ЛТ_{max}$	50	45	40	45	40	50	45	45
$f_{цт max}(ЛТ)$	0,4	0,1	0,2	0,15	0,2	0,25	0,2	0,2
Форма графика	ЛН	ЛН	КВ	КВ	ЛН	КВ	КВ	КВ

Примечание. В таблицах 1 – 3 введены следующие обозначения: ЛН – линейная форма; КВ – квадратичная форма.

Таблица 2. Результаты опроса экспертов для шкалы СТ

Table 2. Results of the expert survey for schools with

Граничный параметр	Эксперты							Среднее значение
	11	22	23	24	25	26	77	
$СТ_{min}$	30	40	30	40	30	35	40	35
$f_{цп min}(СТ)$	0,2	0,0	0,05	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
$СТ_{max}$	50	45	45	55	45	60	50	50
$f_{цп max}(СТ)$	0,4	0,2	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2	0,3
Форма графика	ЛН	ЛН	КВ	КВ	ЛН	КВ	КВ	КВ

По рассчитанным средним значениям были определены нормирующие функции, описываемые следующими выражениями:

$$f_{цт}(ЛТ) = \begin{cases} 0,2, & \text{если } ЛТ < 30, \\ 0,2 - 0,0012(ЛТ - 30)^2, & \\ \text{если } 30 \leq ЛТ < 37,5, \\ 0,05 + 0,0013(ЛТ - 45)^2, & \\ \text{если } 37,5 \leq ЛТ < 45, \\ 0,05, & \text{если } ЛТ \geq 45, \end{cases} \quad (7)$$

$$f_{цт}(СТ) = \begin{cases} 0,3, & \text{если } СТ < 35, \\ 0,3 - 0,0018(СТ - 35)^2, & \\ \text{если } 33 \leq СТ < 42, \\ 0,1 + 0,0018(СТ - 50)^2, & \\ \text{если } 42,5 \leq СТ < 50, \\ 0,1, & \text{если } СТ \geq 50. \end{cases} \quad (8)$$

С учетом рекомендаций МСГНРП и мнения отобранной группы экспертов уровень АП ЦНС $UAP_{цт}$ по паре показателей ЛТ и СТ определяется агрегатором вида

$$UAP_{\text{цт}} = f_{\text{цт}}(\text{ЛТ}) + f_{\text{цт}}(\text{СТ}) - f_{\text{цт}}(\text{ЛТ}) f_{\text{цт}}(\text{СТ}). \quad (9)$$

При выборе тестов типа «Сложная зрительно-моторная реакция» мы исходили из того, что практически все методики, реализуемые ПКФ-ВП, относятся именно к этой группе тестов, причем они тестируют состояние двух когнитивных функций, наиболее нагружаемых в ходе выполнения инженерной деятельности. Этот прибор реализует 6 методик, оценивающих различные свойства внимания, и 5 методик оценки состояния блоков оперативной памяти.

Анализ литературы и собственные исследования показали, что при

реализации инженерной деятельности наиболее нагруженной является свойство концентрации внимания (КВ), а методика определения отсутствующей цифры (ООЦ) нагружает блоки, осуществляющие семантические преобразования на уровне взаимодействия кратковременной и долговременной памяти, что также характерно для исследуемого класса деятельности. Для получения нормировочной функции по данным концентрированности внимания $f_{\text{цв}}(\text{КВ})$ эксперты построили таблицу 3 граничных значений этой функции аналогично таблицам 1 и 2.

Таблица 3. Результаты опроса экспертов для шкалы КВ

Table 3. Results of the expert survey for the KV scale

Граничный параметр	Эксперты							Среднее значение
	11	22	23	24	25	26	77	
KB_{\min}	140	140	160	150	150	150	160	150
$f_{\text{цв min}}(\text{КВ})$	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
KB_{\max}	240	250	260	250	250	250	250	250
$f_{\text{цв max}}(\text{КВ})$	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4
Форма графика	КВ	ЛН	КВ	КВ	ЛН	КВ	КВ	КВ

По рассчитанным средним значениям была получена соответствующая аналитическая модель вида

$$f_{\text{цв}}(\text{КВ}) = \begin{cases} 0,4, & \text{если } \text{КВ} < 150, \\ 0,4 - 0,00006(\text{КВ} - 150)^2, & \\ \text{если } 150 \leq \text{КВ} < 200, \\ 0,1 + 0,00006(\text{КВ} - 250)^2, & \\ \text{если } 200 \leq \text{КВ} < 250, \\ 0,1, & \text{если } \text{КВ} \geq 250. \end{cases} \quad (10)$$

Аналогично эксперты получили нормирующую функцию уровня адаптации ЦНС по данным методики определения отсутствующей цифры $f_{\text{цт}}(\text{ООЦ})$:

$$f_{\text{цт}}(\text{ООЦ}) = \begin{cases} 0,4, & \text{если } \text{ООЦ} < 1500, \\ 0,4 - 0,0000375(\text{ООЦ} - 1700)^2, & \\ \text{если } 1500 \leq \text{КВ} < 1700, \\ 0,1 + 0,0000375(\text{ООЦ} - 1900)^2, & \\ \text{если } 1700 \leq \text{ООЦ} < 1900, \\ 0,1, & \text{если } \text{ООЦ} \geq 1900. \end{cases} \quad (11)$$

С учетом рекомендаций МСГНРП и мнения экспертов уровень АП ЦНС $UAP_{цсп}$ по паре показателей КВ и ООЦ определяется агрегатором вида

$$UAP_{цсп} = f_{цв}(КВ) + f_{цп}(ООЦ) - f_{цв}(КВ) f_{цп}(ООЦ). \quad (12)$$

Агрегация моделей (9) и (12) дает нечеткую модель оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы:

$$UAP_{цнс} = UAP_{цт} + UAP_{цсп} - UAP_{цт} UAP_{цсп}. \quad (13)$$

Экспертная оценка полученного решающего правила, проводимая по методике, описанной в работе [18, с. 198–214], показала, что уровень доверия к модели (11) превышает величину 0,90. В ходе математического моделирования, проводимого по исходным данным, сформированным экспертами, была получена уверенность на уровне 0,95, что является хорошим результатом для задач оценки адаптационного потенциала органов и систем человека при нечетком описании исследуемых классов состояний.

Выводы

В работе предложен метод оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы у инженерно-технического персонала по информативным признакам, характеризующим процессы адаптации в этой составляющей нервной системы, учитывающий особенности структуры исследуемых классов состояний и способы их обработки с целью достижения требуемых для медицинских и психологических приложений показателей качества принимаемых решений. Используя предложенный метод, получена нечеткая математическая модель оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы по таким показателям, как уровни личной и ситуативной тревожности, концентрированность внимания и состояние блоков оперативной памяти, определяемое по методике определения отсутствующей цифры. В ходе экспертного оценивания и математического моделирования было показано, что уверенность в правильной оценке уровня искомого адаптационного потенциала превышает величину 0,9.

Список литературы

1. Ломов Б. Ф. Основные проблемы инженерной психологии // Институт психологии Российской академии наук. Организационная психология и психология труда. 2022. Т. 7, № 1. С. 226–262. https://doi.org/10.38098/ipran.opwp_2022_22_1_011
2. Брумштейн Ю. М., Молимонов Д. А. Модели, методы, технические средства управления рисками проектирования, создания и эксплуатации сложных человеко-машинных систем с учетом психофизиологических характеристик людей-операторов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2019. № 3 (47). С. 143–162.

3. Матель В. А., Шишлянникова О. А. Система «человек-машина» и анализ и влияние факторов среды на производительность и здоровье работников // Российский экономический вестник. 2023. Т. 6, № 2. С. 58–63.
4. Брумштейн Ю. М., Молимонов Д. А. Математические модели и методы решения задач информационного обеспечения, управления и оценки качества работы операторов в сложных человеко-машинных системах // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. № 3. С. 73–89. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2019-3-73-89>
5. Анализ когнитивных функций и нейрофизиологических процессов при адаптации человека к условиям арктики / Е. П. Муртазина, И. И. Коробейникова, Л. В. Поскоятинова, Н. А. Каратыгин, С. С. Перцов // Российский медико-биологический вестник имени академика И. П. Павлова. 2023. Т. 31, № 2. С. 293–304. <https://doi.org/10.17816/P AVLOVJ109581>
6. Величковский Б. Б. Когнитивные эффекты умственного утомления // Вестник Московского университета. Серия 14: Психология. 2019. № 1. С. 108–122. <https://doi.org/10.11621/vsp.2019.01.108>
7. Применение инструментов дискретной оптимизации для классификации когнитивного дефицита: особенности использования минимаксного и аддитивного критериев / Ю. А. Мезенцев, О. М. Разумникова, П. С. Павлов, И. В. Тарасова, О. А. Трубникова // Программные продукты и системы. 2021. № 4. С. 579–588. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.136.579-588>
8. Когнитивные расстройства у пациентов умственного труда с хронической ишемией головного мозга, их профессиональная дезадаптация и выгорание / М. А. Трещинская, В. Д. Мишиев, Л. Н. Сулий, М. В. Глоба // Психиатрия, психотерапия и клиническая психология. 2019. Т. 10, № 2. С. 241–250.
9. Ахапкин Р. В., Файзуллоев А. З. Структура когнитивных нарушений у больных с не психотическими депрессивными расстройствами // Кремлевская медицина. Клинический вестник. 2020. № 3. С. 54–64.
10. Фешин Б. Н. Оператор-диспетчер в интегрированных системах управления. Информационно-психологическая подготовка // Автоматика. Информатика. 2020. № 2. С. 31–35.
11. Родионова С. Н. Метод оценки неспецифической защиты организма человека по показателям, характеризующим процессы адаптации // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 175–192. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-175-192>

12. Математические модели прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы, провоцируемых комбинированным воздействием разнородных факторов риска / Т. Н. Говорухина, М. А. Мясоедова, И. Ю. Григоров, А. В. Поляков // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 2. С. 110–116. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.18.2.022>

13. Быков А. В. Метод и нечеткая модель оценки степени тяжести ишемической болезни центральной гемодинамической системы // Вестник новых медицинских технологий. 2019. Т. 24, № 4. С. 144–150. https://doi.org/10.12737/article_5a38fb1e7bef61.32280165

14. Прогнозирование и оценка степени тяжести ишемии сердца на основе гибридных нечётких моделей / И. А. Комлев, О. В. Шаталова, С. В. Дегтярев, А. В. Серебровский // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 1 (30). С. 133–145. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50423113>

15. Методы и алгоритмы формирования слабых классификаторов в ансамбле классификаторов прогнозирования сердечно-сосудистых рисков / З. У. Протасова, О. В. Шаталова, А. А. Б. Дафалла, С. В. Дегтярев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 3 (32). С. 64–83.

16. Шаталова О. В., Медников Д. А., Протасова З. У. Мультиагентная интеллектуальная система для прогноза риска сердечно-сосудистых осложнений с синергетическими каналами // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2020. Т. 19, № 3. С. 177–188. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2020.19.3.023>

17. Модели латентных предикторов в интеллектуальных системах прогнозирования состояния живых систем / А. В. Киселев, О. В. Шаталова, З. У. Протасова, С. А. Филист, Н. С. Стадниченко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 114–133.

18. Корневский Н. А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.

19. Стародубцева Л. В. История разработки аналоговых нейронных сетей и перспективы их использования для медицинских приложений в разработках советских ученых // Медицинская техника. 2022. № 4 (334). С. 46–48.

20. Стародубцева Л. В. Вклад курских исследователей в развитие систем обработки символической информации // История и педагогика естествознания. 2021. № 3-4. С. 61–65. <https://doi.org/10.24412/2226-2296-2021-3-4-61-65>

21. Метод синтеза математических моделей прогнозирования и ранней диагностики нарушений когнитивных функций / Н. А. Корневский, А. В. Поляков, С. Н. Родионова, Т. Н. Говорухина // Системный анализ и управление в биотехнических системах. 2019. Т. 18, № 4. С. 85–92. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.18.4.011>

22. Метод и нечеткие модели оценки функциональных состояний оперативной памяти / А. Ю. Рыбаков, С. Н. Родионова, К. В., Разумова, Н. А. Милостная, Н. Л. Коржук // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 2. С. 106–125. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-106-125>

References

1. Lomov B.F. The main problems of engineering psychology. *Institut psihologii Rossijskoj akademii nauk. Organizacionnaya psihologiya i psihologiya truda = Institute of Psychology of the Russian Academy of Sciences. Organizational Psychology and Labor Psychology*. 2022;7(1):226–262. (In Russ.) https://doi.org/10.38098/ipran.opwp_2022_22_1_011

2. Brumstein Y.M., Molimonov D.A. Models, methods, technical means of risk management for designing, creating and operating complex human-machine systems taking into account the psychophysiological characteristics of human operators. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2019;(3):143–162. (In Russ.)

3. Matel V.A., Shishlyannikova O.A. The «man-machine» system and the analysis and influence of environmental factors on productivity and health of workers. *Rossijskij ekonomicheskij vestnik = Russian Economic Bulletin*. 2023;6(2):58–63. (In Russ.)

4. Brumstein Y.M., Molimonov D.A. Mathematical models and methods for solving problems of information support, management and evaluation of the quality of operator work in complex human-machine systems. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Computer Science*. 2019;(3):73–89. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2019-3-73-89>

5. Murtazina E.P., Korobeynikova I.I., Poskotinova L.V., Karatygin N.A., Pertsov S.S. Analysis of cognitive functions and neurophysiological processes in human adaptation to Arctic conditions. *Rossijskij mediko-biologicheskij vestnik imeni akademika I.P. Pavlova = Russian Biomedical Bulletin named after Academician I.P. Pavlov*. 2023;31(2):293–304. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/P AVLOVJ109581>

6. Velichkovsky B.B. Cognitive effects of mental fatigue. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 14: Psihologiya = Bulletin of the Moscow University. Episode 14: Psychology*. 2019;(1):108–122. (In Russ.) <https://doi.org/10.11621/vsp.2019.01.108>

7. Mezentsev Y.A., Razumnikova O.M., Pavlov P.S., Tarasova I.V., Trubnikova O.A. The use of discrete optimization tools for the classification of cognitive deficits: features of using minimax and additive criteria. *Programmnye produkty i sistemy = Software Products and Systems*. 2021;(4):579–588. (In Russ.) <https://doi.org/10.15827/0236-235X.136.579-588>

8. Treshchinskaya M.A., Mishiev V.D., Suliy L.N., Globa M.V. Cognitive disorders in mental health patients with chronic cerebral ischemia, their professional maladaptation and burnout. *Psihiatriya, psihoterapiya i klinicheskaya psihologiya = Psychiatry, Psychotherapy and Clinical Psychology*. 2019;10(2):241–250. (In Russ.)

9. Akhupkin R.V., Fayzulloev A.Z. The structure of cognitive impairment in patients with nonpsychotic depressive disorders. *Kremlevskaya medicina. Klinicheskij vestnik = Kremlin Medicine. Clinical Bulletin*. 2020;(3):54–64. (In Russ.)

10. Feshin B.N. Operator-dispatcher in integrated control systems. Information and psychological training. *Avtomatika. Informatika = Automation. Computer Science*. 2020;(2):31–35. (In Russ.)

11. Rodionova S.N. The method of assessing the nonspecific protection of the human body by indicators characterizing the processes of adaptation. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;13(4):175–192. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-175-192>

12. Govorukhina T.N., Myasoedova M.A., Grigorov I.Yu., Polyakov A.V. Mathematical models of forecasting and early diagnosis of diseases of the nervous system provoked by the combined effects of heterogeneous risk factors. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2019;8(2):110–116. (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.18.2.022>

13. Bykov A.V. Method and fuzzy model for assessing the severity of ischemic disease of the central hemodynamic system. *Vestnik novyh medicinskih tekhnologij = Bulletin of New Medical Technologies*. 2019;24(4):144–150. (In Russ.) https://doi.org/10.12737/article_5a38fb1e7bef61.32280165

14. Komlev I.A., Shatalova O.V., Degtyarev S.V., Serebrovsky A.V. Prediction and assessment of the severity of cardiac ischemia based on hybrid fuzzy models. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University*.

Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2019; 9(1):133–145. (In Russ.)

15. Protasova Z.U., Shatalova O.V., Dafalla A.A.B., Degtyarev S.V. Methods and algorithms for the formation of weak classifiers in the ensemble of classifiers for predicting cardiovascular risks. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2019;9(3):64–83. (In Russ.)

16. Shatalova O.V., Mednikov D.A., Protasova Z.U. Multi-agent intelligent system for predicting the risk of cardiovascular complications with synergetic channels. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomeditsinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems.* 2020;19(3):177–188. (In Russ.) <https://doi.org/10.36622/VSTU.2020.19.3.023>

17. Kiselyov A.V., Shatalova O.V., Protasova Z.U., Filist S.A., Stadnichenko N.S. Models of latent predictors in intelligent systems for predicting the state of living systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020;10(1):114–133. (In Russ.)

18. Korenevsky N.A., Rodionova S.N., Khripina I.I. Methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems. *Stary Oskol: TNT;* 2019. 472 p. (In Russ.)

19. Starodubtseva L.V. The history of the development of analog neural networks and the prospects of their use for medical applications in the development of Soviet scientists. *Medicinskaya tekhnika = Medical Technology.* 2022;(4):46–48. (In Russ.)

20. Starodubtseva L.V. Contribution of Kursk researchers to the development of symbolic information processing systems. *Istoriya i pedagogika estestvoznaniya = History and Pedagogy of Natural Science.* 2021; (3-4):61–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2226-2296-2021-3-4-61-65>

21. Korenevsky N.A., Polyakov A.V., Rodionova S.N., Govorukhina T.N. Method of synthesis of mathematical models for forecasting and early diagnosis of cognitive impairment. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biotekhnicheskikh sistemah = System Analysis and Management in Biotechnical Systems.* 2019;18(4):85–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.18.4.011>

22. Rybakov A.Y., Rodionova S.N., Razumova K.V., Milostnaya N.A., Korzhuk N.L. Method and fuzzy models for evaluating the functional states of RAM. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series:*

Информация об авторах / Information about the Authors

Корневский Николай Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-2048-0956

Nikolay A. Korenevsky, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-2048-0956

Сафронов Руслан Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электроэнергетики, Курский государственный аграрный университет имени И. И. Иванова, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: russafronov@yandex.ru, ORCID: 0009-0004-5151-4711

Ruslan I. Safronov, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electric Power Engineering, Kursk Agricultural University named after I. I. Ivanov, Kursk, Russian Federation, e-mail: russafronov@yandex.ru, ORCID: 0009-0004-5151-4711

Лукаш Олеся Юрьевна, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Lukash.o@ya.ru, ORCID: 0000-0003-3148-8371

Olesya Y. Lukash, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-3148-8371

Родионова Софья Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: knsofia@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4477-3975

Sofya N. Rodionova, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: knsofia@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4477-3975

Сипливый Геннадий Вячеславович, доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры анатомии, Курский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sigena2005@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0175-3445

Gennady V. Siplivy, Doctor of Sciences (Medical), Professor, Professor of the Department of Anatomy, Kursk State Medical University Ministry of Health of the Russian Federation, Kursk, Russian Federation, e-mail: sigena2005@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0175-3445

Аксёнов Виталий Вячеславович, старший преподаватель кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: aksenchik777@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6516-1871

Vitaly V. Aksenov, Senior Lecturer of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: aksenchik777@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6516-1871

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-181-196>



УДК 621.391.26

Нечеткие модели ранней диагностики неврозов, провоцируемых факторами риска инженерного труда

О. Ю. Лукаш¹, Р. И. Сафронов², С. Н. Родионова¹, К. В. Разумова¹ ✉,
О. А. Кныш¹, А. А. Трусевич¹

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

² Курский государственный аграрный университет имени И. И. Иванова
ул. К. Маркса, д. 70, г. Курск 305021, Российская Федерация

✉ e-mail: myelectronworld@mail.ru

Резюме

Целью исследования является синтез нечетких моделей ранней диагностики неврозов, провоцируемых факторами риска инженерного труда, обеспечивающих приемлемое для практической медицины качество принимаемых решений.

Методы. Анализ структуры данных и исследуемых классов невротических расстройств показал, что задачи ранней диагностики, включая раннюю диагностику неврозов, относятся к классу плохоформализуемых задач. Это позволяет использовать методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил, разработанную в Юго-Западном государственном университете, в качестве базового математического аппарата. Эффективность использования этой методологии многократно проверялась на различных задачах прогнозирования и медицинской диагностики со структурой данных аналогичной нашей задаче.

Результаты. В ходе проведенных исследований было реализовано три уровня проверки качества работы полученных моделей принятия решений. На первом уровне оценка производилась экспертами путем определения мер доверия к полученным решающим правилам. На втором уровне эксперты составили модельные контрольные выборки, по которым определялось количество правильных и ошибочных решений диагностической модели. На третьем уровне контроля формировались контрольные выборки, в которых наличие ранних стадий проверялось с использованием независимых общепринятых методов исследования. В ходе проведенных расчетов было показано, что качество классификации превышает величину 0,95.

Заключение. Получены нечеткие решающие правила диагностики ранних стадий неврозов у инженерно-технических работников, провоцируемых факторами риска инженерного труда. Оценка качества ранней диагностики осуществлялась с использованием методов экспертного оценивания, математического моделирования и статистического анализа и показала, что полученные гибридные нечеткие модели обеспечивают приемлемое качество ранней диагностики невротических расстройств у инженерно-технических работников различных специальностей, работающих в условиях различной напряженности труда.

Ключевые слова: невротические расстройства; математические модели; ранняя диагностика; инженерно-технический персонал; нечеткие решающие правила.

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

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

Для цитирования: Нечеткие модели ранней диагностики неврозов, провоцируемых факторами риска инженерного труда / О. Ю. Лукаш, Р. И. Сафронов, С. Н. Родионова, К. В. Разумова, О. А. Кныш, А. А. Трусевич // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 4. С. 181–196. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-181-196>

Поступила в редакцию 11.10.2024

Подписана в печать 09.11.2024

Опубликована 27.12.2024

Fuzzy models of early diagnosis of neuroses provoked by risk factors of engineering labor

Olesya Y. Lukash¹, Ruslan I. Safronov², Sofya N. Rodionova¹,
Ksenia V. Razumova¹ ✉, Olga A. Knysh¹, Alyona A. Trusevich¹

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

² Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov
70 K. Marx Str., Kursk 305021, Russian Federation

✉ e-mail: myelectronworld@mail.ru

Abstract

The purpose of the research to synthesize fuzzy models of early diagnosis of neuroses provoked by risk factors in engineering work that ensure the quality of decisions made is acceptable for practical medicine.

Methods. Analysis of the data structure and the studied classes of neurotic disorders showed that early diagnostic tasks, including early diagnosis of neuroses, belong to the class of poorly formulated tasks. This allows using the methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules, developed at the South-West State University, as a basic mathematical apparatus. The effectiveness of using this methodology has been repeatedly tested on various problems of forecasting and medical diagnostics with a data structure similar to our problem.

Results. In the course of the research, three levels of checking the quality of the work of the resulting decision-making models were implemented. At the first level, the assessment was carried out by experts by determining confidence levels in the resulting decision rules. At the second level, the experts compiled model control samples, according to which the number of correct and erroneous decisions of the diagnostic model was determined. At the third level of control, control samples were formed in which the presence of early stages was checked using independent generally accepted research methods. The calculations showed that the quality of classification exceeds 0.95.

Conclusion. Fuzzy decisive rules for diagnosing the early stages of neuroses in engineering and technical workers were obtained. provoked by risk factors of engineering work. The assessment of the quality of early diagnosis was carried out using methods of expert assessment, mathematical modeling and statistical analysis and showed that the resulting hybrid fuzzy models provide acceptable quality of early diagnosis of neurotic disorders in engineering and technical workers of various specialties working in conditions of varying work intensity.

Keywords: neurotic disturbances; mathematical models; early diagnostics; engineering staff; fuzzy decision rules.

Funding: The work was carried out within the framework of the implementation of the development program of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Southwest State University" of the "Priority – 2030" project.

Conflict of interest: *The Authors declares the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Lukash O.Y., Safronov R.I., Rodionova S.N., Razumova K.V., Knysh O.A., Trusevich A.A. Fuzzy models of early diagnosis of neuroses provoked by risk factors of engineering labor. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;14(4):181–196. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-181-196>

Received 11.10.2024

Accepted 09.11.2024

Published 27.12.2024

Введение

Анализ отечественной и зарубежной литературы и собственные исследования показали, что инженерный труд в условиях повышения технического потенциала современного производства требует повышения творческой активности специалистов. Творческая активность инженеров зависит от удовлетворенности работой, социальной значимости и престижа профессии, а также от стремления к профессиональному самосовершенствованию, что, в свою очередь, требует соответствующего здоровья. Неоспорима взаимосвязь между творческой активностью и сочетанием внешних (технологические особенности производства) и внутренних (черты личности, самооценка, увлеченность) факторов, активирующих нервно-психическую деятельность. При возникновении несоответствия состояния функциональных систем работающего организма профессиональным факторам риска может возникать производственный стресс. Это состояние может быть причиной эмоционального, психического и физического истощения, что негативно сказывается на здоровье работающего инженерно-технического персонала. Адаптация к условиям труда требует не только профессиональных навыков, но и устойчивости к внешним стрессовым

факторам [1]. Таким образом, инженерная деятельность при определенных условиях может приводить к появлению и развитию ряда заболеваний, среди которых наиболее распространенными являются невротические расстройства, приграничные психические расстройства и сердечно-сосудистые заболевания. В данной работе решается задача синтеза моделей ранней диагностики неврозов, провоцируемых факторами риска инженерного труда, поскольку своевременное обнаружение этого класса заболеваний и проведение адекватных профилактических мероприятий позволяет, с одной стороны, повысить производительность труда инженеров, а с другой – предотвратить переход к более серьезным классам сердечно-сосудистых заболеваний [2].

Решая вопрос о выборе математического аппарата исследований, авторы руководствовались тем, что наилучшие результаты диагностики, включая раннюю диагностику, достигаются, если используемые математические модели адекватны структуре данных и изучаемых классов состояний [3].

Проведенный разведочный анализ показал, что задачи ранней диагностики, включая раннюю диагностику неврозов, относятся к классу плохоформализуемых задач с нечетким описанием

исследуемых классов состояний, поэтому в качестве базового математического аппарата возможно использование методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), разработанной в Юго-Западном государственном университете [3]. Эффективность применения данной методологии многократно проверялась на различных задачах прогнозирования и медицинской диагностики со структурой данных, аналогичной структуре решаемой в работе задачи. Например, в работе [4] показываются преимущества МСГНРП при решении задач прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний работников предприятий электроэнергетики среди инженерного состава, у которых распространены заболевания нервной системы, в работе [5] в рамках выбранной методологии предложен метод синтеза решающих правил оценки влияния эргономики технических систем на состояние здоровья персонала управляющего работой этих систем, включая инженерный состав, а в работе [6] эта методология используется для синтеза решающих правил оценки влияния экологических факторов риска на состояние здоровья, в работе [7] МСГНРП эффективно использована при решении задач прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний у инженерно-технических сотрудников, работающих в гальванических цехах. Также эта методология успешно применялась при решении следующих медицинских задач: диагностика заболеваний поджелудочной железы [8], прогнозирование и диагностика

профессиональных заболеваний локомотивных бригад [9], оценка влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на состояние здоровья [10], оценка состояния здоровья в зоне действия чрезвычайных ситуаций [11], оценка влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на работоспособность и функциональное состояние [12], оптимизация ведения пациентов с ишемией нижних конечностей [13], диагностика патологии желчных протоков [14], прогнозирование возникновения и развития фатальных осложнений [15], дифференциальная диагностика форм пиелонефрита [16], прогнозирование фатальных осложнений при развитии коронавирусной инфекции [17], прогнозирование инфаркта миокарда [18], оптимизация ведения пациентов с мультицентричным ишемическим поражением [19] и т. д. Анализ эффективности применения МСГНРП при решении перечисленных и других решенных плохоформализуемых задач позволил сделать вывод о целесообразности применения этой методологии для синтеза решающих правил ранней диагностики неврозов у инженерно-технических работников. В этой работе в качестве основных элементов МСГНРП используются функции принадлежности $\mu_{\omega_\ell}(x_i)$ к гипотезам (классам) ω_ℓ , а в качестве базовых переменных наиболее часто выбираются информативные признаки, комплексные показатели, характеризующие объекты исследования, коэффициенты уверенности KU_{ω_ℓ} по событиям ω_ℓ и т. д.

Материалы и методы

В соответствии с общими рекомендациями МСГНРП на первом этапе синтеза искомым решающим правил в ходе разведочного анализа определяется состав информативных признаков. С учетом нечеткой природы обрабатываемых данных состав информативных признаков формировался с учетом рекомендаций [20]. На этом этапе синтеза было показано, что для выяснения наличия ранних стадий невротических расстройств следует использовать систему информативных признаков принятых в традиционной медицинской практике (показатель YOT_p), электрический разбаланс БАТ, связанных с неврозами (показатель ER_N), уровень адаптации организма в целом (показатель UAO), количественные характеристики функционального резерва органов и систем мишеней (показатель YF_p) и показатель уверенности в прогнозе появления неврозов (показатель YPN).

Набор информативных признаков традиционной медицинской практики был определен следующим образом:

1. Снижение концентрации внимания (x_1).
2. Ухудшение памяти (x_2).
3. Спутанность мышления (x_3).
4. Спазмы в животе, ухудшение аппетита (x_4).
5. Зуд и покраснения кожи (x_5).
6. Расстройства сексуального характера (x_6).
7. Беспокойный сон или бессонница (возможна сонливость), может сохраняться на протяжении всего дня (x_7).

8. Частые позывы в туалет (x_8).
9. Болезненные ощущения в мышцах (x_9).
10. Головные боли (x_{10}).
11. Нарушение артериального давления (x_{11}).
12. Изменение сердечного ритма (x_{12}).
13. Периодическая нехватка воздуха (x_{13}).
14. Периодическое ощущение боли в разных органах и наиболее часто в области сердца (x_{14}).
15. Увеличенная частота повышения температуры (x_{15}).

Учитывая, что первые два признака измеряются прибором контроля функций внимания и памяти (ПКФ-ВП), описанным в работе [21], соответствующие функции принадлежности μ_{p1} (КВ) и μ_{p2} (ПВВ) к классу наличия ранней стадии невротических расстройств YV_p и YP_p определяются по шкалам этого прибора с использованием методик КВ и ПВВ:

$$YV_p = \mu_{p1}(\text{КВ}) = \begin{cases} 0, & \text{если КВ} < 100, \\ 0,000015(\text{КВ} - 100)^2, & \text{если } 100 \leq \text{КВ} < 200, \\ 0,3 - 0,000015(\text{КВ} - 100)^2, & \text{если } 200 \leq \text{КВ} < 300, \\ 0,3, & \text{если КВ} \geq 300. \end{cases} \quad (1)$$

$$YP_p = \mu_{p2}(\text{ПВВ}) = \begin{cases} 0, & \text{если ПВВ} < 1000, \\ 6 \cdot 10^{-7} (1000 - \text{ПВВ})^2, & \text{если } 1000 \leq \text{ПВВ} < 1500, \\ 0,3 - 6 \cdot 10^{-3} (2000 - \text{ПВВ})^2, & \text{если } 200 \leq \text{ПВВ} < 300, \\ 0,3, & \text{если ПВВ} \geq 2000. \end{cases} \quad (2)$$

По остальным признакам было выбрано двоичное кодирование признаков ($x_i = 1$ – есть фактор, $x_i = 0$ – нет фактора). Все факторы риска от x_3 до x_{15} при синтезе соответствующего частного правила представлены в виде суммы x_i , т. е.

$$X = \sum_{i=3}^{15} x_i.$$

Уверенность в появлении ранней стадии невротических расстройств по всем 13 признакам определяется функцией принадлежности $\mu_{p13}(X)$ и описывается выражением

$$\mu_{p13}(X) = \begin{cases} 0, & \text{если } X < 3, \\ 0,1X - 0,3, & \\ \text{если } 3 \leq X < 9, & \\ 0,6, & \text{если } X \geq 9. \end{cases}$$

Агрегация $\mu_{p13}(X)$ с моделями (1) и (2) дает частную модель оценки уверенности в наличии ранней стадии невротических расстройств по системе информативных признаков, принятых в традиционной медицинской практике YOT_p :

$$YOT_p = YV_p + YP_p + \mu_{p13}(X) - YV_p YP_p - YV_p \mu_{p13}(X) - YP_p \mu_{p13}(X) + YV_p YP_p \mu_{p13}(X). \quad (3)$$

Уровень адапционного потенциала всего организма UAO определяется в соответствии с рекомендациями [22], а частная модель оценки уверенности в наличии ранней стадии невротических расстройств – по уровню адапционного потенциала всего организма YA_p

через соответствующую функцию принадлежности $\mu_{nao}(UAO)$:

$$YA_p = \mu_{nao}(UAO) = \begin{cases} 0, & \text{если } UAO < 0,2; \\ 1,11(UAO - 0,2)^2, & \\ \text{если } 0,2 \leq UAO < 0,5; & \\ 0,2 - 0,11(UAO - 0,8)^2, & \\ \text{если } 0,5 \leq UAO < 0,8; & \\ 0,2, & \text{если } UAO \geq 0,8. \end{cases} \quad (4)$$

Частная уверенность в наличии ранней стадии невротических расстройств по энергетическому разбалансу БАТ определяется функцией принадлежности $\mu_{pB}(ER_N)$ к лингвистической переменной «ранняя стадия невроза по величине энергетического разбаланса БАТ»:

$$YB_p = \mu_{pB}(ER_N). \quad (5)$$

В выражении (5) энергетический разбаланс системы информативных точек для ситуации невроз определяется моделью вида

$$\begin{aligned} & \text{ЕСЛИ}[(\delta R_{C6} > 10\%) \text{И}(\delta R_{IG7} > 10\%)] \\ & \text{ТО}[ER_N = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 EY_j(\delta R_j)] \\ & \text{ИНАЧЕ}(\exists P = 0), \end{aligned}$$

где ER_N – уровень энергетического разбаланса системы информативных точек для ситуации невроз; $EY_j(\delta R_j)$ – энергетический разбаланс точки с именем Y_j ; $\delta R_1 = \delta R_{C6}$; $\delta R_2 = \delta R_{IG7}$; $\delta R_3 = \delta R_{V14}$; $\delta R_4 = \delta R_{V22}$; $\delta R_5 = \delta R_{V43}$.

Показатель уверенности в прогнозе появления неврозов (YPN) определяется в соответствии с рекомендациями работы [2].

Для оценки уверенности в наличии ранней стадии невротических расстройств Y_{PYP} эксперты получили функцию принадлежности к лингвистической переменной «Ранняя стадия невроза по уровню уверенности Y_{PN} » – $\mu_{PYP}(Y_{PN})$:

$$Y_{PYP} = \mu_{PYP}(Y_{PN}) = \begin{cases} 0, & \text{если } Y_{PN} < 0,3, \\ 2,22(Y_{PN} - 0,3)^2, & \text{если } 0,3 \leq Y_{PN} < 0,6, \\ 0,4 - 2,22(Y_{PN} - 0,8)^2, & \text{если } 0,6 \leq Y_{PN} < 0,9, \\ 0,4, & \text{если } Y_{PN} \geq 0,9. \end{cases} \quad (6)$$

Оценка уверенности в наличии ранней стадии невроза определяется с помощью методик полного воспроизведения (ПВВ) и переключаемости внимания (ПВ) с помощью двух показателей: скоростного VV_j восстановления уровня ФС и отношения ON_j уровня ФС до и после воздействия нагрузкой [23], т. е.:

$$ON_j = FS_{Oj} / FS_{Hj}, \quad (7)$$

$$VV_j = (FS_{Oj} - FS_{Hj}) / T_H. \quad (8)$$

Эти показатели используются для определения функций уровня функционального резерва $f_j(ON_j)$ и $f_j(VV_j)$, по которым определяется искомый функциональный резерв FR_j [23]:

$$FR_j = AG_{FRj} [f_j(ON_j), f_j(VV_j)], \quad (9)$$

где AG_{FRj} – функция агрегации для $f_j(ON_j)$ и $f_j(VV_j)$.

Для когнитивной функции внимания получены аналитические выражения функций $f_j(ON_j)$ и $f_j(VV_j)$:

$$f_{RFV}(ON_V) = \begin{cases} 0,5, & \text{если } ON_V < 1,0, \\ -0,16 ON_V + 0,66, & \text{если } 1,0 \leq ON_V < 3,5, \\ 0,1, & \text{если } ON_V \geq 3,5. \end{cases}$$

$$f_{FRV}(VV_V) = \begin{cases} 0,4, & \text{если } VV_V < 1,0, \\ -0,05 VV_V + 0,45, & \text{если } 1,0 \leq VV_V < 7, \\ 0,1, & \text{если } VV_V \geq 7. \end{cases}$$

Функциональный резерв функции внимания определяется выражением

$$FR_{ПВ} = f_{RFV}(ON_V) + f_{FRV}(VV_V) - f_{RFV}(ON_V) \times f_{FRV}(VV_V).$$

Функция принадлежности для частной уверенности, характеризующей раннюю стадию невроза по $FR_{ПВ}$, вычисляется по формуле

$$\mu_{РФР}(FR_{ПВ}) = \begin{cases} 0,3, & \text{если } FR_{ПВ} < 0,1, \\ -0,5FR_{ПВ} + 0,35, & \text{если } 0,1 \leq FR_{ПВ} < 0,7, \\ 0, & \text{если } FR_{ПВ} \geq 0,7. \end{cases}$$

Функциональный резерв оперативной памяти для шкалы $ПВВ$ определяется по формуле

$$FR_{ПВВ} = f(ON) + f(VV) - f(ON) \cdot f(VV),$$

$$\text{где } f_{ON} = \begin{cases} 1, & \text{если } ON \leq 1, \\ -0,1 ON + 0,7, & \text{если } 1 < ON \leq 6, \\ 0,1, & \text{если } ON > 6. \end{cases}$$

$$f_{VV} = \begin{cases} -VV + 0,5, & \text{если } VV < 0,4, \\ 0,1, & \text{если } VV > 0,4. \end{cases}$$

Для показателя $FR_{ПВВ}$ соответствующая функция принадлежности определяется формулой

$$\mu_{\text{РФР}}(FR_{\text{ПВВ}}) = \begin{cases} 0,4 & \text{если } FR_{\text{ПВВ}} < 0,2, \\ -0,8FR_{\text{ПВВ}} + 0,56, & \\ \text{если } 0,2 \leq FR_{\text{ПВВ}} < 0,7, & \\ 0, & \text{если } FR_{\text{ПВВ}} \geq 0,7. \end{cases}$$

Агрегация $\mu_{\text{РФР}}(FR_{\text{ПВ}})$ и $\mu_{\text{РФР}}(FR_{\text{ПВВ}})$ дает частную модель оценки уверенности в наличии ранней стадии невроза по величинам функционального резерва:

$$YF_p = \mu_{\text{РФР}}(FR_{\text{ПВ}}) + \mu_{\text{РФР}}(FR_{\text{ПВВ}}) - \mu_{\text{РФР}}(FR_{\text{ПВ}})(FR_{\text{ПВВ}}). \quad (10)$$

Полученные частные модели ранней диагностики неврозов при выполнении инженерно конструкторской деятельности на основе рекомендаций МСГНРП объединяются в общую диагностическую модель вида:

$$YRF(j+1) = YRF(j) + R_q[1 - YRF(j)], \quad (11)$$

где $YRF(1) = R_1 = YOT_p$; $R_2 = YA_p$;

$R_3 = YB_p$; $R_4 = YPY_p$; $R_5 = YF_p$.

Проведенная в рамках МСГНРП экспертная оценка уровня доверия к диагностической модели (11) показала, что данная модель обеспечивает уверенность в правильном принятии решений не меньше 0,95, следовательно, считается хорошим результатом для подобного класса решающих правил.

Результаты и их обсуждение

В ходе проводимых исследований было реализовано три уровня проверки качества работы полученных моделей принятия решений.

На первом уровне оценка производилась экспертами путем определения мер доверия к решениям, полученным с использованием искомых решающих правил в соответствии с методом описанным в работы [20]. Проведенная в рамках МСГНРП экспертная оценка уровня доверия к диагностической модели (11) превышает величину 0,95.

На втором уровне эксперты составили модельные контрольные выборки, по которым определялось количество правильных и ошибочных решений прогностической и диагностической моделями. В контрольные выборки включались объекты с ярко выраженными объектами альтернативных классов (отсутствие и незначительное число факторов риска для класса «здоров» и наличие всех и большинства факторов риска для альтернативного класса) с наиболее часто встречающимися значениями факторов риска для обеих классов, со значениями факторов риска, которые, по мнению экспертов, равновероятно можно отнести как к одному, так и к другому исследуемому классу состояний. В ходе математического моделирования, проводимого по контрольным выборкам, сформированным экспертами, уверенность в правильной классификации для модели (11) составила 0,97.

Для реализации третьего уровня контроля формировались контрольные выборки, в которых прогноз возникновения и развития невротических расстройств и наличие их ранних стадий проводилась с использованием

независимых общепринятых методов исследования. В исследовании принимали участие проектировщики радиоэлектронных систем, конструкторы систем автоматики, проектировщики строительных конструкций и руководители конструкторских отделов, что позволило в контрольные выборки включить обследуемых с различным стажем работы и различной напряженностью труда, являющейся одним из основных факторов риска. Объем контрольной выборки составил 100 человек на класс. Качество классификации определялось по диагностической чувствительности (ДЧ), специфичности (ДС) и диагностической эффективности (ДЭ).

Для статистической проверки качества работы моделей ранней диагностики (модель 11) ежегодно с 2020 по 2024 гг. отбирались по 100 человек, которые при выполнении инженерно-конструкторской деятельности не получили неврозов, и 100 человек той же профессии с подтвержденной ранней стадией невротических расстройств. В ходе проведенных расчетов получены следующие средние значения показателей качества: ДЧ = 0,96, ДС = 97 и ДЭ = 0,96, что обеспечивают приемлемое для практики качество принимаемых решений.

Таким образом, трехуровневая проверка качества полученных в работе моделей позволяет рекомендовать результаты проведенного исследования для использования в практической медицине.

Выводы

В работе получены нечеткие модели ранней диагностики неврозов, провоцируемых факторами риска инженерного труда, в составе которых используются: показатель уровня адаптации организма в целом, электрический разбаланс БАТ, связанных с неврозами, показатель уверенности в прогнозе появления неврозов, система информативных признаков, принятых в традиционной медицинской практике, количественные характеристики функционального резерва органов и систем мишеней. Проведенная оценка качества принимаемых решений с использованием методов экспертного оценивания, математического моделирования и статистического анализа показала, что полученные гибридные нечеткие модели обеспечивают приемлемое качество ранней диагностики невротических расстройств у инженерно-технических работников различных специальностей, работающих в условиях различной напряженности труда.

Список литературы

1. Ломов Б. Ф. Основные проблемы инженерной психологии // Институт психологии Российской академии наук. Организационная психология и психология труда. 2022. Т. 7, № 1. С. 226–262 https://doi.org/10.38098/ipran.opwp_2022_22_1_011
2. Математические модели прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы, провоцируемых комбинированным воздействием разнородных

факторов риска / Т. Н. Говорухина, М. А. Мясоедова, И. Ю. Григоров, А. В. Поляков // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 2. С. 110–116. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.18.2.022>

3. Корневский Н. А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки притяни решений: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.

4. Математические модели оценки влияния электромагнитных полей на появление и развитие профессиональных заболеваний в электроэнергетической отрасли / М. А. Мясоедова, Н. А. Корневский, Л. В. Стародубцева, М. В. Писарев // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7, № 2. С. 27–42. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.25.2.013>

5. Hybrid fuzzy logic modelling and software for ergonomics assessment of biotechnical systems / R. T. Al-Kasasbeh, M. S. Alshamasin, N. A. Korenevskiy, I. Maksim // International Journal of Computer Applications in Technology. 2019. Vol. 60, N 1. P. 12–26. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2019.099505>

6. Biotechnical monitoring system for determining person's health state in polluted environment using hybrid decisive rules / R. T. Al-Kasasbeh, N. Korenevskiy, S. Filist, O. V. Shatalova, M. S. Alshamasin, A. A. Shaqadan // International Journal of Modelling, Identification and Control. 2019. Vol. 32, N 1. P. 10–22. <https://doi.org/10.1504/IJMIC.2019.101957>

7. Метод синтеза нечетких моделей и ранней диагностики профессиональных заболеваний работников гальванических производств / Н. А. Корневский, И. Ю. Григоров, Т. Н. Говорухина, Р. А. Крупчатников // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 3. С. 163–169. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.18.3.019>

8. Дифференциальная диагностика очаговой патологии поджелудочной железы по данным эндоскопической ультрасонографии на основе нечетких математических моделей / В. А. Белозеров, Н. А. Корневский, С. Н. Григорьев, В. В. Аксенов // Вестник новых медицинских технологий. 2021. Т. 28, № 4. С. 107–112. <https://doi.org/10.24412/1609-2163-2021-4-107-112>

9. Корневский Н. А., Медников Д. А., Стародубцев В. В. Метод синтеза моделей прогнозирования и ранней диагностики профессиональных заболеваний работников локомотивных бригад // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2020. Т. 19, № 3. С. 140–154. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2020.19.3.018>

10. Корневский Н. А., Титова А. В. Метод синтеза нечетких моделей оценки влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на состояние здоровья // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 2. С. 102–117.

11. Метод синтеза математических моделей оценки пожарной обстановки и состояния людей, находящихся в зоне пожара / Н. А. Корневский, М. В. Шевцов, Л. В. Стародубцева, Г. В. Сипливый // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 3. С. 142–159.

12. Корневский Н. А., Титова А. В., Сурнина А. И. Оценка влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на функциональное состояние и работоспособность операторов на основе технологии мягких вычислений // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 2. С. 120–137.

13. Оптимизация ведения пациентов, страдающих критической ишемией нижних конечностей с учетом риска развития гангрены / А. В. Быков, Н. А. Корневский, С. А. Пархоменко, И. И. Хрипина // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2019. Т. 18, № 2. С. 38–44.

14. Белозеров В. А., Корневский Н. А., Коржук Н. Л. Диагностика патологии внепеченочных желчных протоков по данным эндоскопической ультрасонографии с использованием нечетких математических моделей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 2. С. 149–164. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-149-164>

15. Прогнозирование возникновения и развития фатальных сосудистых осложнений при COVID-19 с использованием нечетких математических моделей / А. В. Быков, Н. А. Корневский, А. В. Винников, А. И. Безуглов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 1. С. 145–159. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-145-159>

16. Математические модели дифференциальной диагностики форм пиелонефрита для экспертных систем врачей-урологов / Н. А. Корневский, Г. В. Сипливый, Д. С. Родионов, Т. Н. Говорухина, В. В. Дмитриева // Медицинская техника. 2019. № 6 (318). С. 48–50.

17. Метод прогнозирования фатальных осложнений при развитии коронавирусной инфекции на фоне системной красной волчанки / А. В. Винников, А. В. Быков, Н. А. Корневский, Л. П. Лазурин, П. С. Азарова, Г. К. Усубалиева // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2021. Т. 20, № 2. С. 63–69. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.20.2.008>

18. Математическая модель нечеткого прогнозирования рецидивов инфаркта миокарда / С. П. Серегин, Н. А. Корневский, К. А. Истомина, Ю. А. Челебаева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 2 (31). С. 101–111.

19. Бокерия Л. А., Быков А. В., Корневский Н. А. Оптимизация ведения пациентов с мультицентричным ишемическим поражением на базе нечетких интеллектуальных технологий: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 400 с.
20. Метод комплексной оценки уровня информативности классификационных признаков в условиях нечеткой структуры данных / Н. А. Корневский, В. В. Аксенов, С. Н. Родионова, С. Н. Гонтарев, Л. П. Лазурина, Р. И. Сафронов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 3. С. 80–86. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-80-96>
21. Метод и нечеткие модели оценки функциональных состояний оперативной памяти / А. Ю. Рыбаков, С. Н. Родионова, К. В. Разумова, Н. А. Милостная, Н. Л. Коржук // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 2. С. 106–125. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-106-125>
22. Родионова С. Н. Метод оценки неспецифической защиты организма человека по показателям, характеризующим процессы адаптации // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 175–192. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-175-192>
23. Оценка защитных функций организма и его систем по показателям функционального состояния и функционального резерва / Н. А. Корневский, С. Н. Родионова, К. В. Разумова, О. Ю. Лукаш // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2023. Т. 13, № 3. С. 67–77. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.22.3.009>

References

1. Lomov B.F. The main problems of engineering psychology. Institut psihologii Rossijskoj akademii nauk. *Organizacionnaya psihologiya i psihologiya truda = Institute of Psychology of the Russian Academy of Sciences. Organizational Psychology and Labor Psychology*. 2022;7(1):226–262. (In Russ.) https://doi.org/10.38098/ipran.opwp_2022_22_1_011
2. Govorukhina T.N., Myasoedova M.A., Grigorov I.Yu., Polyakov A.V. Mathematical models for forecasting and early diagnostics of nervous system diseases caused by combined effects of heterogeneous risk factors. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskix sistemax = Systems Analysis and Control in Biomedical Systems*. 2019;18(2):110–116. (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.18.2.022>
3. Korenevsky N.A., Rodionova S.N., Khripina I.I. Methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems. Stary Oskol: TNT; 2019. 472 p. (In Russ.)

4. Myasoedova M.A., Korenevsky N.A., Starodubtseva L.V., Pisarev M.V. Mathematical models for assessing the influence of electromagnetic fields on the emergence and development of occupational diseases in the electric power industry. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2019;7(2):27–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.25.2.013>
5. Al-Kasasbeh R.T., Alshamasin M.S., Korenevskiy N.A., Maksim I. Hybrid fuzzy logic modelling and software for ergonomics assessment of biotechnical systems. *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2019;60(1):12–26. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2019.099505>
6. Al-Kasasbeh R.T., Korenevskiy N., Filist S., Shatalova O.V., Alshamasin M.S., Shaqadan A.A. Biotechnical monitoring system for determining person's health state in polluted environment using hybrid decisive rules. *International Journal of Modelling, Identification and Control*. 2019;32(1):10–22. <https://doi.org/10.1504/IJMIC.2019.101957>
7. Korenevsky N.A., Grigorov I.Yu., Govorukhina T.N., Krupchatnikov R.A. Method of synthesis of fuzzy models and early diagnosis of occupational diseases of workers in galvanic industries. *Sistemny`j analiz i upravlenie v biomedicinskix sistemax = Systems Analysis and Control in Biomedical Systems*. 2019;18(3):163–169. (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.18.3.019>
8. Belozarov V.A., Korenevsky N.A., Grigoriev S.N., Aksenov V.V. Differential diagnostics of focal pathology of the pancreas according to endoscopic ultrasonography data based on fuzzy mathematical models. *Vestnik novykh medicinskih tekhnologij = Bulletin of New Medical Technologies*. 2021;28(4):107–112. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/1609-2163-2021-4-107-112>
9. Korenevsky N.A., Mednikov D.A., Starodubtsev V.V. Method for synthesizing models for predicting and early diagnostics of occupational diseases of locomotive crew workers. *Sistemny`j analiz i upravlenie v biomedicinskix sistemax = Systems Analysis and Control in Biomedical Systems*. 2020;19(3):140–154. (In Russ.) <https://doi.org/10.36622/VSTU.2020.19.3.018>
10. Korenevsky N.A., Titova A.V. Method for synthesizing fuzzy models for assessing the impact of electromagnetic fields of the radio frequency range on health. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2020;10(2):102–117. (In Russ.)
11. Korenevsky N.A., Shevtsov M.V., Starodubtseva L.V., Siplivyy G.V. Method for synthesizing mathematical models for assessing a fire situation and the condition of people in the fire zone. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the*

Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2021;11(3):142–159. (In Russ.)

12. Korenevsky N.A., Titova A.V., Surnina A.I. Assessment of the influence of electromagnetic fields of the radio frequency range on the functional state and performance of operators based on soft computing technology. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2021;11(2):120–137. (In Russ.)*

13. Bykov A.V., Korenevsky N.A., Parkhomenko S.A., Khripina I.I. Optimization of management of patients suffering from critical lower limb ischemia taking into account the risk of gangrene development. *Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika = Cardiovascular Therapy and Prevention. 2019;18(2):38–44. (In Russ.)*

14. Belozеров V.A., Korenevsky N.A., Korzhuk N.L. Diagnostics of extrahepatic bile duct pathology based on endoscopic ultrasonography data using fuzzy mathematical models. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2022;12(2):149–164. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-149-164>*

15. Bykov A.V., Korenevsky N.A., Vinnikov A.V., Bezuglov A.I. Forecasting the occurrence and development of fatal vascular complications in COVID-19 using fuzzy mathematical models. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2022;12(1):145–159. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-145-159>*

16. Korenevsky N.A., Siplivyy G.V., Rodionov D.S., Govorukhina T.N., Dmitrieva V.V. Mathematical models of differential diagnostics of pyelonephritis forms for expert systems of urologists. *Medicinskaya tekhnika = Medical Equipment. 2019;(6):48–50. (In Russ.)*

17. Vinnikov A.V., Bykov A.V., Korenevsky N.A., Lazurina L.P., Azarova P.S., Usabalieva G.K. Method for predicting fatal complications in the development of coronavirus infection against the background of systemic lupus erythematosus. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = Systems Analysis and Control in Biomedical Systems. 2021;20(2):63–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.20.2.008>*

18. Seregin S.P., Korenevsky N.A., Istomina K.A., Chelebaeva Yu.A. Mathematical model of fuzzy forecasting of myocardial infarction recurrence. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika.*

Meditinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2019;9(2):101–111. (In Russ.)

19. Bokeria L.A., Bykov A.V., Korenevsky N.A. Optimization of patient management with multicentric ischemic lesions based on fuzzy intelligent technologies. Stary Oskol: TNT; 2019. 400 p. (In Russ.)

20. Korenevsky N.A., Aksenov V.V., Rodionova S.N., Gontarev S.N., Lazurina L.P., Safonov R.I. Method of complex assessment of the information content level of classification features in conditions of fuzzy data structure. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2023;(3):80–96. (In Russ.)

21. Rybakov A.Y., Rodionova S.N., Razumova K.V., Milostnaya N.A., Korzhuk N.L. Method and fuzzy models for evaluating the functional states of RAM. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2024;14(2):106–125. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-106-125>

22. Rodionova S.N. Method for assessing non-specific protection of the human body based on indicators characterizing adaptation processes. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2023;13(4):175–192. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-175-192>

23. Korenevsky N.A., Rodionova S.N., Razumova K.V., Lukash O.Yu. Assessment of the protective functions of the body and its systems based on indicators of the functional state and functional reserve. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskix sistemax = Systems Analysis and Control in Biomedical Systems.* 2023;13(3):67–77. (In Russ.) <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.22.3.009>

Информация об авторах / Information about the Authors

Лукаш Олеся Юрьевна, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Lukash.o@ya.ru

Olesya Y. Lukash, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: Lukash.o@ya.ru

Сафронов Руслан Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электроэнергетики, Курский государственный аграрный университет имени И. И. Иванова, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: russafronov@yandex.ru, ORCID: 0009-0004-5151-4711

Родионова Софья Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: knsofia@mail.ru

Разумова Ксения Викторовна, кандидат технических наук, преподаватель кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: myelectronworld@mail.ru, ORCID: 0009-0007-7942-8083

Кныш Ольга Анатольевна, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ol.knish@yandex.ru

Трусевич Алёна Александровна, студент кафедры биомедицинской инженерии Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alyona.04@list.ru, ORCID: 0009-0003-3734-9257

Ruslan I. Safronov, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electric Power Engineering, Kursk Agricultural University named after I. I. Ivanov, Kursk, Russian Federation, e-mail: russafronov@yandex.ru, ORCID: 0009-0004-5151-4711

Sofya N. Rodionova, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: knsofia@mail.ru

Ksenia V. Razumova, Candidate of Sciences (Engineering), Lecturer of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: myelectronworld@mail.ru, ORCID: 0009-0007-7942-8083

Olga A. Knysh, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ol.knish@yandex.ru

Alyona A. Trysevich, Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: alyona.04@list.ru, ORCID: 0009-0003-3734-9257

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

1. К публикации в журнале «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» 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://swsu.ru/izvestiya/seriesivt/>.