

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

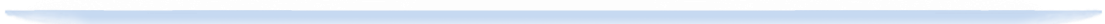
Известия

**Юго-Западного
государственного университета**

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

Научный журнал

Том 14 № 2 / 2024



Proceedings

**of the Southwest
State University**

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

Scientific Journal

Vol. 14 № 2 / 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)

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

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

Корневский 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 под лицензией 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 28.06.2024. Формат 60×84/8.

Дата выхода в свет 02.08.2024

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 24,7.

Тираж 1000 экз. Заказ 25.

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

16+

© Southwest State University, 2024



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

Signed for printing 28.06.2024. Format 60×84/8.

Release date 02.08.2024.

Offset paper. Printer's sheets: 24,7.

Circulation 1000 copies. Order 25.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ	8
Оценка степени тяжести сопряженной ишемии в условиях атеросклероза сонных артерий и артерий нижних конечностей	8
<i>Быков А. В., Лищук А. Н., Кореневский Н. А., Винников А. В.</i>	
Оценка дальности полёта и передачи видеоинформации при мониторинге чрезвычайных ситуаций с беспилотного летательного аппарата в сложных метеорологических условиях	21
<i>Алемпьев М. Ю., Семенова А. Е., Коптев Д. С., Довбня В. Г.</i>	
МЕХАТРОНИКА, РОБОТОТЕХНИКА.....	40
Методы противодействия атакам и организации выбора средств защиты каналов при управлении авиационными робототехническими устройствами	40
<i>Хмелевская А. В., Бабанин И. Г., Севрюков А. Е., Николаенко А. И., Бабанина Е. Ю., Севрюков А. А.</i>	
The possibility of unifying neural interfaces to create an integrated control system for prostheses: a brief review.....	60
<i>Samandari A. M., Afonin A. N.</i>	
РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ	72
Разработка метода распознавания эмоций по речевому сигналу	72
<i>Кравчук Д. А.</i>	
Мультимодальный классификатор риска кардиореспираторных заболеваний с учетом сопутствующих заболеваний и эффекта синергии	81
<i>Петрунина Е. В., Шаталова О. В., Алави Хайдер А. Х., Песок В. В., Кузьмин А. А., Шульга Л. В.</i>	
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ.....	106
Метод и нечеткие модели оценки функциональных состояний оперативной памяти	106
<i>Рыбаков А. Ю., Родионова С. Н., Разумова К. В., Милостная Н. А., Коржук Н. Л.</i>	
Моделирование информативных признаков на основе амплитудно-фазовой частотной характеристики при проведении биоимпедансных исследований на биологическом объекте	126
<i>Корсунский Н. А., Реутов Д. К., Малышев А. А., Томакова Р. А.</i>	
Мультимодальный классификатор риска рака молочной железы на основе анализа импеданса биоматериала	142
<i>Серебровский А. В., Шаталова О. В., Лях А. В., Халин И. А., Башмакова И. А., Протасова З. У.</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	160
Метод синтеза моделей оценки состояния оперативной памяти операторов человеко-машинных систем на основе нечеткой логики принятия решений	160
<i>Кореневский Н. А., Рыбаков А. Ю., Родионова С. Н., Разумова К. В.</i>	
Моделирование интерпретатора функционального языка программирования с возможностями метапрограммирования.....	181
<i>Чаплыгин А. А.</i>	
Разработка имитационной модели и настройка гиперпараметров нейронной сети для прогнозирования возможных состояний сети малых космических аппаратов	194
<i>Шиленков Е. А., Фролов С. Н., Титенко Е. А.</i>	
К сведению авторов.....	213

CONTENT

INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS	8
<i>Original articles</i>	
Assessment of the severity of associated ischemia in conditions of atherosclerosis of the carotid arteries and arteries of the lower extremities	8
<i>Bykov A. V., Lischuk A. N., Korenevskiy N. A., Vinnikov A. V.</i>	
Assessment of flight range and transmission of video information when monitoring emergency situations from an unmanned aircraft in difficult meteorological conditions	21
<i>Alempiev M. Y., Semenova A. E., Koptev D. S., Dovbnya V. G.</i>	
MECHATRONICS, ROBOTICS	40
<i>Original articles</i>	
Methods of countering attacks and organizing the choice of channel protection tools when controlling aviation robotic devices	40
<i>Khmelevskaya A. V., Babanin I. G., Sevryukov A. E., Nikolaenko A. I., Babanina E. Y., Sevryukov A. A.</i>	
Возможность интеграции нейроинтерфейсов для создания комбинированной системы управления протезами: краткий обзор	60
<i>Самандари А. М., Афонин А. Н.</i>	
IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING	72
<i>Original articles</i>	
Development of a method for recognizing emotions from a speech signal	72
<i>Kravchuk D. A.</i>	
Multimodal risk classifier for cardiorespiratory diseases taking into account concomitant diseases and synergy effect	81
<i>Petrulina E. V., Shatalova O. V., Alawsi Hayder A. H., Pesok V. V., Kuzmin A. A., Shulga L. V.</i>	
SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING	106
<i>Original articles</i>	
The method and fuzzy models for evaluating the functional states of RAM	106
<i>Rybakov A. Y., Rodionova S. N., Razumova K. V., Milostnaya N. A., Korzhuk N. L.</i>	
Modeling of informative features based on the amplitude-phase frequency response during bioimpedance studies at a biological facility	126
<i>Korsunskii N. A., Reutov D. K., Malyshev A. A., Tomakova R. A.</i>	
Multimodal breast cancer risk classifier based on biomaterial impedance analysis	142
<i>Serebrovsky A. V., Shatalova O. V., Lyakh A. V., Khalin I. A., Bashmakova I. A., Protasova Z. U.</i>	
MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS	160
<i>Original articles</i>	
Method for synthesis of models for assessing the state of ram memory of operators of human-machine systems based on fuzzy decision making logic	160
<i>Korenevskiy N. A., Rybakov A. Y., Rodionova S. N., Razumova K. V.</i>	
Modeling of functional language interpreter with metaprogramming	181
<i>Chaplygin A. A.</i>	
Development of a simulation model and adjustment of hyperparameters of a neural network for predicting possible states of a network of small space carriages	194
<i>Shilenkov E. A., Frolov S. N., Titenko E. A.</i>	
Information for Authors	213

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-8-20>



УДК 004.93

Оценка степени тяжести сопряженной ишемии в условиях атеросклероза сонных артерий и артерий нижних конечностей

А. В. Быков¹, А. Н. Лищук², Н. А. Корневский³, А. В. Винников³ ✉

¹ Курская областная многопрофильная клиническая больница
ул. Сумская, д. 45а, г. Курск 305007, Российская Федерация

² Национальный медицинский исследовательский центр высоких медицинских технологий –
Центральный военный клинический госпиталь имени А. А. Вишневого
тер. 3 ЦВКГ им. А. А. Вишневого, д. 1, Московская область, городской округ Красногорск,
п. Новый 143420, Российская Федерация

³ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Резюме

Целью исследования является разработка метода оценки степени тяжести ишемических процессов при мультифокальном атеросклерозе на фоне хронической сосудисто-мозговой недостаточности и хронической ишемии нижних конечностей.

Методы. Основными методами, используемыми в данном исследовании, являются методология синтеза гибридных нечетких решающих правил, разведочный анализ, метод экспертного оценивания Делфи. Расчеты производились на основе модели Г. Раша и итерационной модели Е. Шортлиффа.

Результаты. В ходе проводимых исследований были синтезированы частные решающие правила для оценки нарушений регуляторных функций головного мозга, ишемических нарушений головного мозга и нижних конечностей, нарушений двигательных функций нижних конечностей, на основе которых с помощью итерационной модели Е. Шортлиффа и агрегирующих решающих правил были сформированы промежуточные решающие правила, которые, в свою очередь, вошли в финальное решающее правило «степень тяжести ишемического взаимодействия». Далее на основе финального решающего правила был разработан алгоритм оценки степени тяжести ишемических взаимодействий для коморбидных пациентов с дезинтеграцией аффекторно-эффektorных механизмов взаимодействия периферических органов и регуляторных функций центральной нервной системы, позволяющий оценить степень выраженности ишемического процесса и риска развития фатальных осложнений у пациентов с рассматриваемой патологией.

Заключение. В ходе проведенных исследований были продемонстрированы высокие результаты применения синтезированных частных решающих правил в рамках поставленной в данном исследовании задачи, а также была показана целесообразность использования полученных моделей и методов в практике работы невролога, сосудистого хирурга, ангионевролога, нейрохирурга.

© Быков А. В., Лищук А. Н., Корневский Н. А., Винников А. В., 2024

Ключевые слова: мультифокальный атеросклероз; решающие правила; ишемические нарушения; нечеткая логика; функция принадлежности.

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

Для цитирования: Оценка степени тяжести сопряженной ишемии в условиях атеросклероза сонных артерий и артерий нижних конечностей / А. В. Быков, А. Н. Лищук, Н. А. Кореневский, А. В. Винников // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 2. С. 8–20. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-8-20>

Поступила в редакцию 10.04.2024

Подписана в печать 08.05.2024

Опубликована 28.06.2024

Assessment of the severity of associated ischemia in conditions of atherosclerosis of the carotid arteries and arteries of the lower extremities

Alexander V. Bykov¹, Alexander N. Lischuk²,
Nikolay A. Korenevskiy³, Artem V. Vinnikov³ ✉

¹ Kursk Regional Multidisciplinary Clinical Hospital
45a Sumskaya Str., Kursk 305007, Russian Federation

² National Medical Research Center for High Medical Technologies – A. A. Vishnevsky Central Military Clinical Hospital
1 ter. 3 CMCH named after A. A. Vishnevsky, Moscow Region, Krasnogorsk District,
Novy 143420, Russian Federation

³ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop a method for assessing the severity of ischemic processes in multifocal atherosclerosis against the background of chronic cerebrovascular insufficiency and chronic ischemia of the lower extremities.

Methods. The main methods used in this study are the methodology for the synthesis of hybrid fuzzy decision rules, exploratory analysis, and the Delphi expert assessment method; calculations were based on the G. Rush model and the E. Shortliff iterative model.

Results. In the course of the research, particular decisive rules were synthesized to assess violations of the regulatory functions of the brain, ischemic disorders of the brain and lower extremities, disorders of the motor functions of the lower extremities, on the basis of which, using the iterative model of E. Shortliff and aggregating decisive rules, intermediate decisive rules were formed, which, in turn, entered the final decisive rule "severity of ischemic interaction". Further, based on the final decisive rule, an algorithm was developed to assess the severity of ischemic interactions for comorbid patients with disintegration of affective-effector mechanisms of interaction between peripheral organs and regulatory functions of the central nervous system, allowing to assess the severity of the ischemic process and the risk of fatal complications in patients with the pathology in question.

Conclusion. In the course of the conducted research, high results were demonstrated in the application of synthesized partial decision rules within the framework of the task set in this study, and the expediency of using the obtained models and methods in the practice of a neurologist, vascular surgeon, angioedrologist, neurosurgeon was also shown.

Keywords: multifocal atherosclerosis; decisive rules; ischemic disorders; fuzzy logic; membership function.

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

For citation: Bykov A.V., Lischuk A.N., Korenevskiy N.A., Vinnikov A.V. Assessment of the severity of associated ischemia in conditions of atherosclerosis of the carotid arteries and arteries of the lower extremities. *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(2):8–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-8-20>

Received 10.04.2024

Accepted 08.05.2024

Published 28.06.2024

Введение

В настоящее время очень актуальной проблемой является оценка состояния коморбидных пациентов с мультифокальным атеросклерозом (МФА), хронической ишемией нижних конечностей (ХИНК) и хронической сосудисто-мозговой недостаточностью (ХСМН) [1]. По показателям смертности и распространенности на территории Российской Федерации и во всем мире рассматриваемые патологии уступают только хронической сердечной недостаточности (ХСН), ишемическим болезням сердца (ИБС) и онкологическим заболеваниям [2]. Столь высокие показатели обусловлены неуправляемостью ишемических процессов [3], а также дезорганизацией взаимодействия центральной нервной системы (ЦНС) и периферических систем органов [4].

С целью повышения эффективности медицинской помощи, оказываемой пациентам с дезинтеграцией аффлекторно-эффлекторных механизмов взаимодействия периферических органов и регуляторных функций ЦНС, в рамках МФА [5] на кафедре БМИ ЮЗГУ был разработан метод на основе гибридного интеллекта и нечеткой логики [6], позволяющий оценить степень тяжести состояния

таких пациентов и решить проблему их комплексной реабилитации с помощью синтеза решающих правил степени тяжести ишемического взаимодействия (СТИВ) [7].

Материалы и методы

Для поиска рационального состава диагностических признаков, выбора и оценки эффективности схем комплексной реабилитации в качестве объекта исследования были выбраны 120 человек, проходившие наблюдение и лечение у специалистов БМУ «Курская областная многопрофильная клиническая больница». Возрастная структура пациентов представлена следующими группами: 45–55 лет (19,2%), 56–60 лет (45,3%), 61–65 лет (25,8%) и 66–75 лет (8,7%).

На первом этапе исследования производится, в соответствии с общими методами синтеза решающих правил, формирование состава информативных признаков [8].

Согласно разведочному анализу используемых диагностических критериев у коморбидных пациентов с мультифокальным атеросклерозом [9], было решено выбрать следующую группу показателей:

X_1 – показатель комплексной реабилитации (ПКР);

X_2 – электроэнцефалография (ЭЭГ);

X_3 – непрерывное мониторирование гликемии (НМГ);

X_4 – ультразвуковое исследование брахиоцефальных артерий (УЗИ БЦА);

X_5 – реоэнцефалография (РЕГ);

X_6 – реовазография (РВГ);

X_7 – ультразвуковое исследование артерий нижних конечностей (УЗИ АНК);

X_8 – лабораторные показатели.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенной по методу Делфи экспертизы [10] данный перечень был признан наиболее полным, и каждому из показателей были даны свои заключения по информативности по шкале с диапазоном [0,1]. Рассмотрим средние величины показателей (табл. 1).

Таблица 1. Средние значения экспертной информативности прогностических признаков

Table 1. Average values of expert informativeness of prognostic features

X_i	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
Экспертная уверенность	0,45	0,55	0,67	0,45	0,58	0,37	0,68	0,53

В общем виде модель описывается выражением

$$UGMA = F(OKI, IMI, LMI), \quad (1)$$

где UGMA – синтезированный критерий дифференцированного отбора пациентов с МФА; OKI – уверенность в развитии ишемии, рассчитываемая по показателю комплексной реабилитации; IMI – уверенность в появлении и развитии ишемии на основании данных инструментальных исследований; LMI – уверенность в появлении и развитии ишемии по данным лабораторных исследований.

Для формирования первого показателя эксперты определили шкалу в виде системы градации (табл. 2).

Проведение измерений по всем параметрам с использованием балльной оценки будет отражать актуальный реабилитационный профиль [11].

Показатель X_2 (ЭЭГ) представляется традиционными измеряемыми в медицинской практике показателями для выявления функционального состояния головного мозга при мультифокальном атеросклерозе: частота α ритма (α); частота β ритма (β).

Показатель X_3 (НМГ) представляется показателями, характеризующими нервную проводимость в периферических нервах: амплитуда М-ответа (АмМ); амплитуда F-волны (АмF); Н-рефлекс (Нреф).

Таблица 2. Система градации X_1 **Table 2.** Graduation system X_1

Симптомы	Балл
Снижение памяти	1
Периодические головные боли	2
Нарушения сна	3
Нарушения артикуляции, фонации	4
Неустойчивость при ходьбе, боль в покое в нижних конечностях	5
Синдром паркинсонизма, деменция	6
Прогрессирование симптомов	7
Падения, обмороки	8
Психическая деградация, расстройства речи, чувствительности	9
Сосудистая деменция, нарушения интеллекта	10

Показатель X_4 (УЗИ БЦА) отображен показателями исследования кровотока в просветах сосудов, позволяющими количественно оценить линейную скорость кровотока [12]: ПСС кровотока внутренней сонной артерии (V-BCA); ПСС кровотока наружной сонной артерии (V-НСА); ПСС кровотока общей сонной артерии (V-ОСА); ПСС кровотока позвоночных артерий на стороне поражения (V-ПА) [12].

Показатель X_5 (РЭГ) представлен показателями, характеризующими состояние небольших вен и состояние мелких артерий: дикротический показатель (ДКП); диастолический показатель (ДСП) [4].

Показатель X_6 (РВГ) отражен показателями, характеризующими состояние общего регионарного кровотока в исследуемом органе: амплитудно-частотный показатель (АЧП), реографический индекс (РИ) [5].

Показатель X_7 (УЗИ АНК) выражен такими показателями, как: лодыжечно-плечевой индекс (ЛПИ); степень стеноза магистральных артерий (ССМА); отношение ПСС (стеноз) / ПСС (без стеноза) (ИПС 1).

Показатель X_8 (лабораторные показатели) характеризуют следующие параметры: протромбиновый индекс (ПТИ); тромбоциты (TR); активированное частичное тромбопластиновое время (АЧТВ); Д-димер (ДД); антитромбин – 3 (АТ-3); антитела при антифосфолипидном синдроме (АФС – АТ); острофазовый показатель (СРБ).

В соответствии с общей моделью синтеза частных нечетких решающих правил [13] на втором этапе определяются вид и параметры функций принадлежности к классу «нарушения регуляторных функций головного мозга». На данном этапе по каждому показателю и признаку определены следующие

функции принадлежности и правила их получения [14]:

X_1 – показатель комплексной реабилитации (ПКР);

$$\mu_{\omega 1}(X_1) = 0,025 X_1 + 0,05, \quad (2)$$

где X_1 – сумма набранных баллов (табл. 2);

X_2 – инструментальные методы исследования (ЭЭГ);

$$\mu_{\omega 1}(X_2) = \mu_{\omega 1}(\alpha) + \mu_{\omega 1}(\beta) - \mu_{\omega 1}(\alpha) \cdot \mu_{\omega 1}(\beta), \quad (3)$$

$$\mu_{\omega 1}(\alpha) = \begin{cases} 0,18, & \text{если } \alpha < 5, \\ -0,06\alpha + 0,48, & \text{если } 5 \leq \alpha < 8, \\ 0, & \text{если } \alpha \geq 8, \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{\omega 1}(\beta) = \begin{cases} 0, & \text{если } \beta < 7, \\ 0,01\beta - 0,1, & \text{если } 7 \leq \beta < 20, \\ 0,2, & \text{если } \beta \geq 20. \end{cases} \quad (5)$$

Функции принадлежности и правила их получения для признаков $X_3 - X_8$ формируются аналогично функциям и правилам для признака X_2 [15].

С учетом того, что каждый из выбранных показателей увеличивает уверенность развития у обследуемого ишемии головного мозга [16], базовая прогностическая модель представляет собой итерационную формулу вида [17]:

$$UI(q+1) = UI(q) + \mu_{\omega 1}(X_{i+1}) [1 - UI(q)], \quad (6)$$

где q – номер итерации; $UI(1) = \mu_{\omega 1}(X_1)$.

В ходе исследований было установлено, что целесообразно ввести промежуточные правила для формирования финального правила СТИБ [18].

Таким образом, эксперты выбрали следующие решающие правила [19]:

1. Степень ишемии ГМ (LIB).
2. Степень нарушения регуляции ЦНС (LINS).
3. Степень нарушения мышечной активности НК (LIM).
4. Степень ишемии НК (UST).

Для признака LIB с учетом рекомендаций по синтезу гибридных нечетких решающих правил [20] были выбраны параметры: $\mu_{\omega 1}(X_1)$; $\mu_{\omega 1}(X_4)$; $\mu_{\omega 1}(X_5)$; $\mu_{\omega 1}(X_8)$. Он определяется следующими агрегирующими решающими правилами:

$$\mu_{\omega 2}(Z_1) = \mu_{\omega 2}(LIB) = \mu_{\omega 2}(Y_1) + \mu_{\omega 2}(Y_2) - \mu_{\omega 2}(Y_1) \cdot \mu_{\omega 2}(Y_2), \quad (7)$$

$$\mu_{\omega 2}(Y_1) = \mu_{\omega 1}(X_1) + \mu_{\omega 1}(X_4) - \mu_{\omega 1}(X_1) \cdot \mu_{\omega 1}(X_4), \quad (8)$$

$$\mu_{\omega 2}(Y_2) = \mu_{\omega 1}(X_5) + \mu_{\omega 1}(X_8) - \mu_{\omega 1}(X_5) \cdot \mu_{\omega 1}(X_8). \quad (9)$$

Для признака LINS с учетом рекомендаций по синтезу гибридных нечетких решающих правил [20] экспертами были выбраны следующие параметры: $\mu_{\omega 1}(X_1)$; $\mu_{\omega 1}(X_2)$; $\mu_{\omega 1}(X_4)$; $\mu_{\omega 1}(X_5)$; $\mu_{\omega 1}(X_6)$.

Для признака LIM с учетом рекомендаций по синтезу гибридных нечетких решающих правил [20] были выбраны следующие параметры: $\mu_{\omega 1}(X_1)$; $\mu_{\omega 1}(X_2)$; $\mu_{\omega 1}(X_3)$.

Для признака UST с учетом рекомендаций по синтезу гибридных нечетких решающих правил [20] были выбраны следующие параметры: $\mu_{\omega 1}(X_1)$; $\mu_{\omega 1}(X_6)$; $\mu_{\omega 1}(X_7)$; $\mu_{\omega 1}(X_8)$.

LINS, LIM и UST определяются агрегирующими решающими правилами, сформированными аналогично правилам LIB [20].

С учетом увеличения уверенности в том, что у обследуемого разовьются нарушения автономной регуляции головного мозга периферических двигательных функций, каждым из выбранных показателей, базовая прогностическая модель описывается итерационной формулой вида [17]:

$$\begin{aligned} \text{СТИВ}(q+1) = & \text{СТИВ}(q) + \\ & + \mu_{\dot{\omega}2}(Z_{i+1}) \cdot [1 - \text{СТИВ}(q)], \quad (10) \end{aligned}$$

где q – номер итерации; СТИВ (1) = $\mu_{\dot{\omega}2}(Z_1)$.

Эксперты с использованием технологии Делфи на шкале SAR определили четыре класса СТИВ [11]:

- 1) S1 – СТИВ от 5% до 20%;
- 2) S2 – СТИВ от 20% до 40%;
- 3) S3 – СТИВ от 40% до 60%;
- 4) S4 – тотальная СТИВ.

На рисунке 1 приведены графики функции принадлежности $\mu_{st}(SAR)$ к выделенным классам СТИВ при переходе к конечной логике принятия решений.

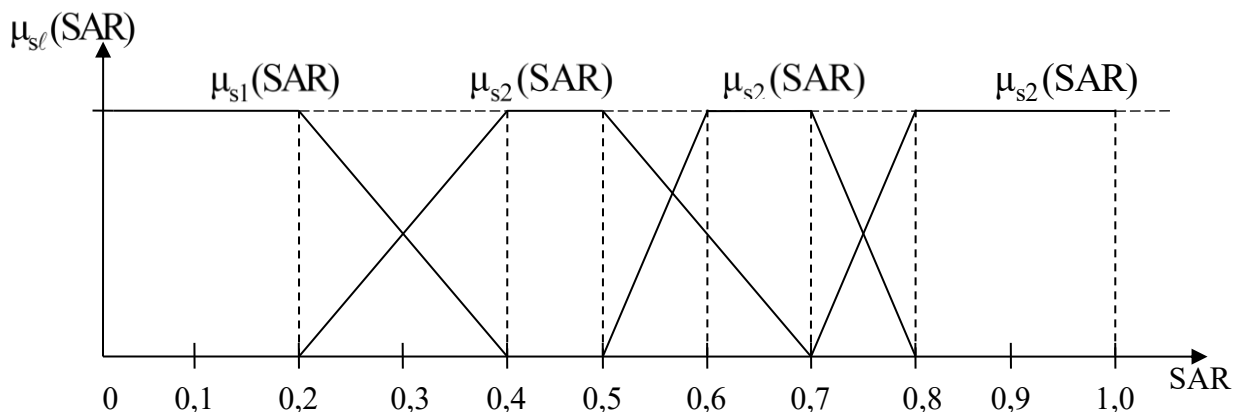


Рис. 1. Графики функции принадлежности $\mu_{st}(SAR)$ к выделенным классам СТИВ

Fig. 1. Graphs of the accessory function $\mu_{st}(SAR)$ to the selected STIV classes

Уверенность в отношении обследуемых к классу $S\ell$ определяется выражением [13]:

$$\begin{aligned} UI_{\ell} = \max [\mu_{s1}(SAR), \mu_{s2}(SAR), \\ \mu_{s3}(SAR), \mu_{s4}(SAR)]. \quad (11) \end{aligned}$$

При равенстве двух функций пациент относится к более тяжелой стадии заболевания.

С целью оценки эффективности математической модели было проведено

перспективное исследование. В течение двух лет велось наблюдение пациентов БМУ «Курская областная многопрофильная клиническая больница», у которых отсутствовали признаки МФА, но присутствовали другие ишемические заболевания, среди которых были ХСМН и ХИНК. Для каждого пациента вначале были рассчитаны величины UI [9]. Значение $UI > 0,25$ являлось критерием отбора в группу наблюдения [8].

Рассмотрим, результаты наблюдения на основе полученных данных (табл. 3).

Показатели качества классификации, рассчитанные по данным, приведены ниже (табл. 4).

Таблица 3. Распределение результатов работы модели после двух лет наблюдений

Table 3. Distribution of the results of the model after two years of observations

Пациенты	Результаты исследования		Всего
	положительные	отрицательные	
$n_1 = 20$	41	9	20
$n_2 = 100$	7	63	100
Всего	48	72	120

Таблица 4. Сводная таблица показателей качества возникновения МФА после двух лет наблюдений

Table 4. Summary table of the quality indicators of the emergence of the MFA after two years of observation

Показатель качества	ДЧ	ДС	ПЗ+	ПЗ-	ДЭ
$\Omega_{\ell B}$	0,85	0,88	0,82	0,9	0,86

Выводы

В результате исследования были синтезированы частные решающие правила для оценки нарушений регуляторных функций головного мозга, ишемических нарушений головного мозга и нижних конечностей, нарушений двигательных функций нижних конечностей, а также разработан алгоритм оценки степени тяжести ишемических взаимодействий для пациентов с дезинтеграцией аффлекторно-эффлекторных механизмов

взаимодействия периферических органов и регуляторных функций ЦНС в рамках МФА, осложненного ХИНК и / или ХСМН. Анализ результатов статистических испытаний позволяет рекомендовать полученные результаты для внедрения в медицинскую практику. Предложенные модели делают возможным и рациональным использование описанных методов в практике врача-невролога, сосудистого хирурга, ангионевролога, нейрохирурга.

Список литературы

1. Ибрагимов Р. М. Стандартизация подходов к выбору тактики лечения при мультифокальном атеросклерозе // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. 2012. Т. 5, № 6. С. 12–19.
2. Авалиани В. М., Чернов И. И. Распространенность мультифокального атеросклероза на Европейском Севере России // Экология человека. 2005. № 7. С. 28–32.

3. Хайбуллина З. Р., Косникова И. В. Проявления метаболического синдрома у больных мультифокальным атеросклерозом // Вестник Новосибирского государственного педагогического университета. 2014. Т. 5, № 21. С. 127–136.
4. Гасанова И. Х., Куница В. Н., Гасанли З. Х. Сосудистый компонент в сосудистых сплетениях желудочков головного мозга // Наука и образование: новое время. 2018. № 4. С. 103–112.
5. Прогностическая значимость атеросклеротического поражения одного или двух сосудистых бассейнов у пациентов высокого и очень высокого сердечно-сосудистого риска / В. В. Генкель, А. С. Кузнецова, Е. В. Лебедев, И. И. Шапошник // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2021. Т. 20, № 2. С. 34–40.
6. Корневский Н. А. Проектирование нечетких решающих сетей, настраиваемых по структуре данных для задач медицинской диагностики // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2005. Т. 4, № 1. С. 12–20.
7. Корневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1. С. 33–35.
8. 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.
9. Оценка и управление состоянием здоровья обучающихся на основе гибридных интеллектуальных технологий: монография / Н. А. Корневский, А. Н. Шуткин, С. А. Горбатенко, В. И. Серебровский. Старый Оскол: ТНТ, 2016. 472 с.
10. Корневский Н. А. Проектирование систем принятия решений на нечетких сетевых моделях в задачах медицинской диагностики и прогнозирования // Телекоммуникации. 2006. № 6. С. 25–31.
11. Метод синтеза нечетких решающих правил на основе моделей системных взаимосвязей для решения задач прогнозирования и диагностики заболеваний / Н. А. Корневский, М. В. Артеменко, В. Я. Провоторов, Л. А. Новикова // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2014. Т. 13, № 4. С. 881–886.
12. Ловрикова М. А., Жмеренецкий К. В., Рудь С. С. Атеросклероз брахиоцефальных сосудов: классификация, ультразвуковая диагностика, стандарты лечения // Дальневосточный медицинский журнал. 2015. № 4. С. 118–123.
13. Метод синтеза нечетких моделей принятия решений по оценке состояния и управлению биотехническими системами / Н. А. Корневский, В. В. Серебровский, К. В. Разумова, И. И. Хрипина // Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. № 9. С. 68–74.
14. Корневский Н. А., Шуткин А. Н., Бойцова Е. А. Оценка и управление состоянием здоровья на основе моделей Г. Раша // Медицинская техника. 2015. № 6. С. 37–40.
15. Корневский Н. А., Крупчатников Р. А., Горбатенко С. А. Синтез нечетких сетевых моделей, обучаемых по структуре данных для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2008. № 2. С. 18–24.

16. Корневский Н. А., Хрипина И. И., Лазурина Л. П. Нечеткие коллективные классификаторы для оценки состояния живых систем // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: сборник материалов XII Международной научно-технической конференции / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2015. С. 172–174.

17. Корневский Н. А., Разумова К. В. Синтез нечетких классификационных правил в многомерном пространстве признаков для медицинских приложений // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. Т. 2. № 41. С. 223–227.

18. Корневский Н. А. Проектирование нечетких решающих сетей, настраиваемых по структуре данных для задач медицинской диагностики // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2005. Т. 4, № 1. С. 12–20.

19. Интерактивный метод классификации в задачах медицинской диагностики / Н. А. Корневский, С. В. Дегтярев, С. П. Серегин, А. В. Новиков // Медицинская техника. 2013. № 4. С. 1–3.

20. Шуткин А. Н., Корневская С. Н., Федянин В. В. Проектирование баз знаний медицинских экспертных систем с использованием коллективов нечетких правил // Информационные проекты в медицине и педагогике. Материалы международной научно-практической конференции. М.: ИП Киселева О. В., 2014. С. 61–64.

References

1. Ibragimov R.M. Standardization of approaches to the choice of treatment tactics for multifocal atherosclerosis. *Kardiologiya i serdechno-sosudistaya hirurgiya = Cardiology and Cardiovascular Surgery*. 2012;5(6):12–19. (In Russ.)

2. Avaliani V.M., Chernov I.I. Prevalence of multifocal atherosclerosis in the European North of Russia. *Ekologiya cheloveka = Human Ecology*. 2005;7:28–32. (In Russ.)

3. Khaibullina Z.R., Kosnikova I.V. Manifestations of metabolic syndrome in patients with multifocal atherosclerosis. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta = Bulletin of the Novosibirsk State Pedagogical University*. 2014;5(21):127–136. (In Russ.)

4. Hasanova I.H., Kunitsa V.N., Hasanli Z.H. Vascular component in the vascular plexuses of the ventricles of the brain]. *Nauka i obrazovanie: novoe vremya = Science and Education: New Time*. 2018;(4):103–112. (In Russ.)

5. Genkel V.V., Kuznetsova A.S., Lebedev E.V., Shaposhnik I.I. The prognostic significance of atherosclerotic lesions of one or two vascular basins in patients with high and very high cardiovascular risk. *Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika = Cardiovascular Therapy and Prevention*. 2021;20(2):34–40. (In Russ.)

6. Korenevsky N.A. Proektirovanie nechetkih reshayushchih setej, nastraivaemyh po strukture dannyh dlya zadach medicinskoj diagnostiki [Design of fuzzy decision networks configurable by data structure for medical diagnostics tasks]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah* = *System Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2005;4(1):12–20. (In Russ.)
7. Korenevsky N.A. The use of fuzzy decision-making logic for medical expert systems. *Medicinskaya tekhnika* = *Medical Equipment*. 2015;(1):33–35. (In Russ.)
8. Korenevsky N.A., Rodionova S.N., Khripina I.I. Methodology of synthesis of flexible fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems. Stary Oskol: TNT; 2019. 472 p. (In Russ.)
9. Korenevsky N.A., Shutkin A.N., Gorbatenko S.A., Serebrovsky V.I. Assessment and management of the health status of students based on hybrid intelligent technologies. Stary Oskol: TNT; 2016. 472 p. (In Russ.)
10. Korenevsky N.A. Designing decision-making systems based on fuzzy network models in the tasks of medical diagnostics and forecasting. *Telekommunikacii* = *Telecommunications*. 2006;(6):25–31. (In Russ.)
11. Korenevsky N.A., Artemenko M.V., Provotorov V.Ya., Novikova L.A. Method of synthesis of fuzzy decision rules based on models of system relationships for solving problems of forecasting and diagnosis of diseases. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah* = *System Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2014;13(4):881–886. (In Russ.)
12. Lovrikova M.A., Zhmerenetsky K.V., Rud S.S. Atherosclerosis of brachiocephalic vessels: classification, ultrasound diagnostics, treatment standards. *Dal'nevostochnyj medicinskij zhurnal* = *Far Eastern Medical Journal*. 2015;(4):118–123. (In Russ.)
13. Korenevsky N.A., Serebrovsky V.V., Razumova K.V., Khripina I.I. Method of synthesis of fuzzy decision-making models for assessing the state and management of biotechnical systems. *Biomedicinskaya radioelektronika* = *Biomedical Radioelectronics*. 2016;(9):68–74. (In Russ.)
14. Korenevsky N.A., Shutkin A.N., Boitsova E.A. Ocenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya na osnove modelej G. Rasha [Assessment and management of health status based on G. Rush models]. *Medical equipment* = *Medical Equipment*. 2015;(6):37–40. (In Russ.)
15. Korenevsky N.A., Krupchatnikov R.A., Gorbatenko S.A. Synthesis of fuzzy network models trained on the data structure for medical expert systems. *Medicinskaya tekhnika* = *Medical Equipment*. 2008;(2):18–24. (In Russ.)
16. Korenevsky N.A., Khripina I.I., Lazurina L.P. Fuzzy collective classifiers for assessing the state of living systems. In: *Optiko-elektronnye pribory i ustrojstva v sistemah raspoznavaniya obrazov, obrabotki izobrazhenij i simvol'noj informacii. Sbornik materialov XII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii* = *Optoelectronic devices and devices*

in image recognition, image processing and symbolic information systems: A collection of materials of the XII International Scientific and Technical Conference. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2015. P. 172–174. (In Russ.)

17. Korenevsky N.A., Razumova K.V. Synthesis of fuzzy classification rules in a multi-dimensional feature space for medical applications. *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*. 2012;2(41):223–227. (In Russ.)

18. Korenevsky N.A. Design of fuzzy decision networks configurable by data structure for medical diagnostics tasks. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomeditsinskih sistemah* = *System Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2005;4(1):12–20. (In Russ.)

19. Korenevsky N.A., Degtyarev S.V., Seregin S.P., Novikov A.V. Interactive classification method in the tasks of medical diagnostics. *Meditsinskaya tekhnika* = *Medical Technology*. 2013;(4):1–3. (In Russ.)

20. Shutkin A.N., Korenevskaya S.N., Fedyanin V.V. Designing knowledge bases of medical expert systems using teams of fuzzy rules. *Informacionnye proekty v medicine i pedagogike. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* = *Information projects in medicine and pedagogy: Materials of the international scientific and practical conference*. Moscow: IP Kiseleva O.V.; 2014. P. 61–64. (In Russ.)

Информация об авторе / Information about the Author

Быков Александр Владимирович, кандидат медицинских наук, доцент кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, врач – сердечно-сосудистый хирург, Курская областная многопрофильная клиническая больница, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: bikov-av@yandex.ru

Alexander V. Bykov, Candidate of Sciences (Medical), Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Doctor – Cardiovascular Surgeon, Kursk Regional Multidisciplinary Clinical Hospital, Kursk, Russian Federation, e-mail: bikov-av@yandex.ru

Лищук Александр Николаевич, доктор медицинских наук, профессор, врач высшей категории, Национальный медицинский исследовательский центр высоких медицинских технологий – Центральный военный клинический госпиталь имени А. А. Вишневого, Московская область, городской округ Красногорск, п. Новый, Российская Федерация, e-mail: 3hospital@mil.ru

Alexander N. Lischuk, Doctor of Sciences (Medical), Professor, Doctor of the highest category, National Medical Research Center for High Medical Technologies – A. A. Vishnevsky Central Military Clinical Hospital, Moscow Region, Krasnogorsk District, Novy, Russian Federation, e-mail: 3hospital@mil.ru

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

Винников Артем Викторович, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Artem V. Vinnikov, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-21-39>

УДК 629.7.014, 349.6

Оценка дальности полёта и передачи видеoinформации при мониторинге чрезвычайных ситуаций с беспилотного летательного аппарата в сложных метеорологических условиях

М. Ю. Алемпьев¹, А. Е. Семенова¹, Д. С. Коптев¹✉, В. Г. Довбня¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Современные беспилотные летательные аппараты разнообразных видов обеспечивают возможность выполнения различных задач оперативного сбора информации, контроля за состоянием окружающей среды, технологических объектов и территорий, обновление данных об этих объектах, а также для проведения разведки и наблюдения за их состоянием.

Целью исследования является установление значения максимальной дальности полёта БПЛА при организации канала связи, по которому будут передаваться потоки видеоизображения и команд управления полётом с использованием методов модуляции КАМ-16 и применением помехоустойчивого кодирования Turbo 3/4, между наземным комплексом управления и беспилотным летательным аппаратом в условиях сложной метеорологической обстановки.

Методы опираются на основы радиоэлектроники, диагностики и прогнозирования технического состояния летательных аппаратов. Применялись методы многокритериального анализа, параметрического и структурного синтеза. Использованы принципы передачи видеоизображения с беспилотных средств, используемых для мониторинга чрезвычайных ситуаций. Проведена критическая оценка максимальной дальности полёта беспилотного летательного аппарата в условиях сложной метеорологической обстановки.

Результаты. Представлены аналитические модели для определения энергетического потенциала канала передачи данных при прямой видимости. Приведены графики зависимости энергетического запаса в канале передачи данных между беспилотным летательным аппаратом и наземным комплексом управления, дающие возможность определить максимальные расстояния для передачи видеоизображения в FullHD качестве в диапазоне 2,4 ГГц. На основе комплексных аналитических выражений проведены расчеты и построены графические зависимости дальности полета микроБПЛА от скорости попутного и встречного ветра. Рассчитана максимальная скорость встречного ветра, не позволяющая использовать микроБПЛА в условиях метели.

Заключение. Перспективным направлением изучения применения беспилотных летательных аппаратов при мониторинге чрезвычайных ситуаций являются коптеры класса микро, способные обнаруживать пострадавших с помощью передачи видеoinформации с тепловизора во время поисково-спасательных операций в сложных метеоусловиях, таких как, например, метели.

Ключевые слова: мониторинг; чрезвычайная ситуация; беспилотный летательный аппарат; дальность полета; вид модуляции; сложные метеорологические условия.

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

Для цитирования: Оценка дальности полёта и передачи видеоинформации при мониторинге чрезвычайных ситуаций с беспилотного летательного аппарата в сложных метеорологических условиях / М. Ю. Алемпьев, А. Е. Семенова, Д. С. Коптев, В. Г. Довбня // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 2. С. 21–39. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-21-39>.

Поступила в редакцию 16.04.2024

Подписана в печать 14.05.2024

Опубликована 28.06.2024

Assessment of flight range and transmission of video information when monitoring emergency situations from an unmanned aircraft in difficult meteorological conditions

Mikhail Y. Alempiev¹, Anastasia E. Semenova¹,
Dmitry S. Koptev¹ ✉, Vitaly G. Dovbnya¹

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. Modern unmanned aerial vehicles of various types provide the ability to perform various tasks of operational information collection, monitoring the state of the environment, technological facilities and territories, updating data on these facilities, as well as for reconnaissance and monitoring their condition.

The purpose of the study is to establish the maximum flight range and distance necessary for the organization of a communication channel through which the video stream and flight control commands using the KAM-16 Turbo ¾ method will be transmitted between the ground control complex and the unmanned aerial vehicle in a difficult meteorological situation.

Methods are based on the basics of radio electronics, diagnostics and forecasting of the technical condition of aircraft. The methods of multicriteria analysis, parametric and structural synthesis were used. The principles of transmitting video images from drones used to monitor emergency situations were studied. A critical assessment of the maximum flight range of an unmanned aerial vehicle in a difficult meteorological situation was carried out.

Results. Analytical formulas for determining the energy potential of a data transmission channel in line of sight are presented. Graphs of the dependence of the energy reserve in the data transmission channel between the unmanned aerial vehicle and the ground control system are presented, which make it possible to determine the maximum distance for transmitting video images in Full HD quality in the 2.4 GHz band. Calculations were carried out on the basis of complex analytical expressions and graphical dependences of the flight range of a micro UAV on the speed of tailwind and headwind were constructed. The maximum headwind speed is calculated, which does not allow the use of micro UAVs in blizzard conditions.

Conclusion. A promising area of study of the use of UAV in emergency monitoring are micro-class copters capable of detecting victims by transmitting video information from a thermal imager during search and rescue operations in difficult weather conditions, such as snowstorms.

Keywords: monitoring; emergency; unmanned aerial vehicle; flight range; type of modulation; difficult meteorological conditions.

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. Methods for assessing renal hemodynamics after minimally invasive treatment of urolithiasis. *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): 21–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-21-39>

Received 16.04.2024

Accepted 14.05.2024

Published 28.06.2024

Введение

Совершенствование конструкции и основных служебных подсистем беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), уменьшение их массогабаритных характеристик привели к существенному снижению стоимости и, как следствие, к массовому применению БПЛА, особенно мультироторного типа, в различных прикладных задачах оперативного сбора видеоданных, дистанционного мониторинга за объектами и территориями в зоне непосредственной видимости оператора [1].

Будучи высокоманевренными подвижными объектами, имея достаточно высокую скорость (50–80 км/ч) передвижения, мультироторные БПЛА находят применение для видеомониторинга ситуаций в горных ущельях, дистанционного облета и видеофиксации высоковольтных линий электропередач, дистанционного контроля объектов инфраструктуры жизнеобеспечения (водозаборы, электрические подстанции, газонефтехранилища и др.), мест массового пребывания людей на стадионах, концертах [2]. БПЛА находят применение в строительно-архитектурных задачах: построение перспективных планов, поддержка геодезических работ, текущего контроля строительных работ, поиск опорных точек местности и др. [3].

Перспективы транспортных беспилотных летательных аппаратов весьма обширны, особенно в регионах с низкой

плотностью населения и слабо развитой транспортной инфраструктурой. БПЛА могут обеспечивать срочную доставку важных грузов гражданского назначения, таких как лекарства, продукты питания и другие товары первой необходимости [4]. Построение логистики на основе транспортных БПЛА имеет более выгодные экономические условия в сравнении с пилотируемыми аппаратами, так как почти каждый этап в полном логистическом цикле доставки товаров имеет более выгодные экономические оценки: минимальное время подготовки к взлету, лучшая удельная стоимость перелета, независимость от особенностей проходимости местности, исключение пилота, незначительные ограничения на погодные условия, необязательность посадки БПЛА, возможность полета по заданной карте [5].

На сегодняшний день беспилотные летательные аппараты обширно применяются для решения различных задач по контролю и мониторингу событий, объектов, в т. ч. при чрезвычайных ситуациях (ЧС).

В Российской Федерации активно применяются беспилотные летательные аппараты Министерством чрезвычайных ситуаций (МЧС) России, которое использует их не только для контроля и мониторинга чрезвычайных ситуаций, но и для поиска пострадавших людей и животных, для анализа и оценки нанесенного ущерба от ЧС.

Система аварийного мониторинга, основанная на платформе беспилотных летательных аппаратов, характеризуется высокой эффективностью работы, гибкостью и широким спектром мониторинга. Однако сотрудники МЧС России сталкиваются с рядом трудностей при использовании в широтах России. Погодные условия – немаловажный фактор, который надо учитывать при использовании БПЛА. В метель возникают крайне сложные условия для использования БПЛА, так как корпус беспилотника обледеневает, что приводит к изменению его технических характеристик. Ветер, возникающий во время метели, также оказывает влияние на БПЛА, воздействуя с разной интенсивностью. Вертикальный и встречный ветры влияют на высоту полёта БПЛА и его поступательную скорость соответственно. Боковой ветер вызывает отклонение БПЛА от намеченного курса.

Из существующих разновидностей конструкций БПЛА наибольшую популярность в Министерстве чрезвычайных ситуаций России имеют беспилотники вертолетного (коптерного) и самолетного типа. БПЛА с машущим крылом и аэростатические недостаточно развиты и эффективны, поэтому не могут выполнять поставленные МЧС России задачи лучше, чем БПЛА самолетного и вертолетного типа.

По приведенной статистике МЧС России на 2023 г. в использовании МЧС находятся более 1800 БПЛА коптерного типа и небольшое количество самолетных беспилотников – 60 единиц [6]. Наибольшую часть этих беспилотных летательных аппаратов

составляют именно микроБПЛА, согласно классификации AUVSI (Association for Unmanned Vehicle Systems International), так как они являются оптимальным вариантом для ведения мониторинга ЧС [7].

Целью статьи является анализ предельных характеристик беспилотных летательных аппаратов типа микровертолетного класса в заданных условиях, а именно определение максимальной возможной дальности связи, необходимой для управления полетом, и максимальной возможной дальности связи, необходимой для передачи видеoinформации FullHD качества, в условиях различной интенсивности метели.

Материалы и методы

Для передачи видеоизображения и команд управления с наземного комплекса управления (НКУ) на БПЛА используются два канала связи:

- канал командно-телеметрический (КТ);
- канал передачи видеoinформации (ПВИ).

Для организации линии связи БПЛА-НКУ на открытой местности принято использовать диапазон частот 2,4 ГГц из-за большой длины волны, чем у диапазона 5 ГГц. В условиях метели на БПЛА используют модуль тепловизора для поисково-спасательных операций, а также передачу видеoinформации в качестве FullHD.

В данной статье будем рассмотрен канал передачи видеoinформации (табл. 1). Канал управления БПЛА рассматриваться не будет, исходя из меньших требований к скорости передачи [8; 9].

Таблица 1. Основные параметры канала ПВИ**Table 1.** Main parameters of CT channel and PVI channel

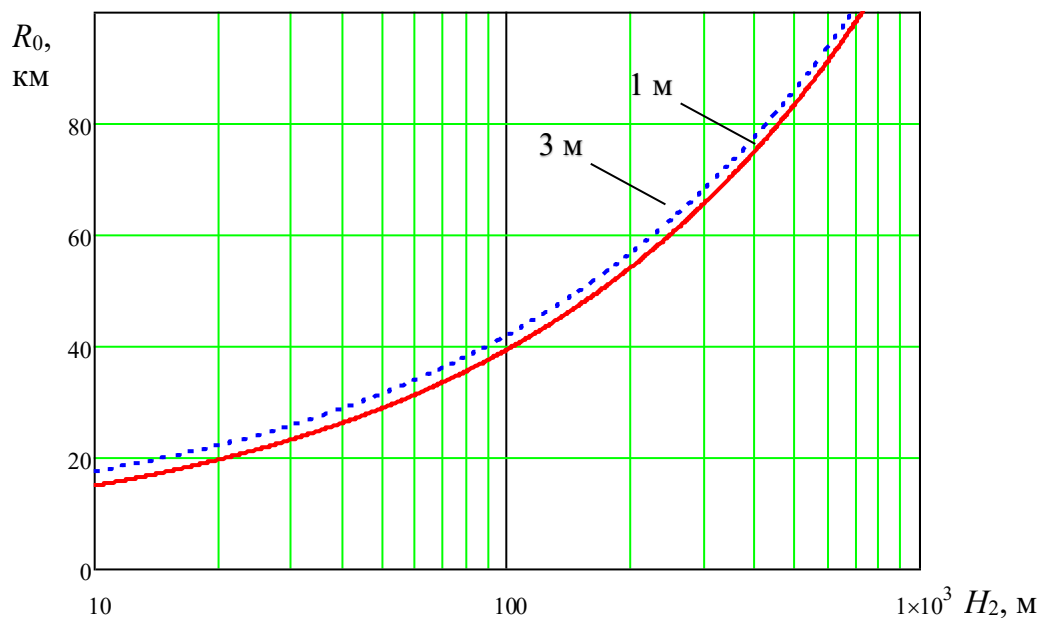
Наименование параметра линии радиосвязи	Канал ПВИ
Вид модуляции	КАМ-16
Максимально допустимая мощность передатчика, дБм	20
Максимальная скорость передачи видеоизображения, Мбит/с FHD (1920×1080, 24/25/30 p)	50 (H.265); 60 (H.264)
Вероятность битовой ошибки, не более	10^{-6}

В общем случае канал связи между БПЛА и наземным пунктом управления (НКУ) представляет собой канал с многолучевым распространением радиоволн (РРВ), характеризующийся отражениями, рассеянием и рефракцией, что вызывает различные виды замираний сигнала, особенно в метель. Максимальная дальность радиосвязи между НКУ и БПЛА (км) ограничивается прямой видимостью и определяется следующей формулой [10]:

$$R_0 = 3,57(\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2}), \quad (1)$$

где H_1 – высота подъема антенны НКУ, м; H_2 – высота подъема БПЛА, м.

Обычно антенна наземного комплекса управления мобильна и располагается на высоте от 1 до 3 метров (стандартные значения) [11]. Графики на рисунке 1 показывают максимальную дальность прямой видимости в зависимости от высоты подъёма БПЛА для типовых значений высоты антенны мобильного наземного комплекса управления.

**Рис. 1.** Графики зависимости дальности прямой видимости от высоты подъема БПЛА с учетом типовых значений подъема антенны НКУ**Fig. 1.** Graphs of the dependence of the line of sight range on the height of the UAV lift, taking into account the typical values of the NKU antenna lift

Согласно графикам, представленным на рисунке 1, максимальная дальность прямой видимости между БПЛА и НКУ слабо зависит от высоты подъема антенны мобильного НКУ. При высоте подъема БПЛА от 100 до 500 метров она составляет от 40 до 85 километров. Поэтому на практике высоту подъема антенны НКУ выбирают в первую очередь для минимизации воздействия многолучевого РРВ, принимая во внимание возможные препятствия на пути распространения сигнала [12]. Направленная антенна представляет собой вариант направленной ребристо-стержневой

антенны с дисковыми элементами, излучающая часть которой содержит: дефлектор для отражения волны в направлении стержня антенны, активный рефлектор-возбудитель (вибратор), к которому подводится передающий сигнал и набор пассивных дисков, задающих и формирующих волну передачи электромагнитного поля. Мощность передаваемого сигнала и геометрические размеры антенны и дисков определяют диаграмму направленности, коэффициент направленного действия (также коэффициент усиления) (рис. 2).

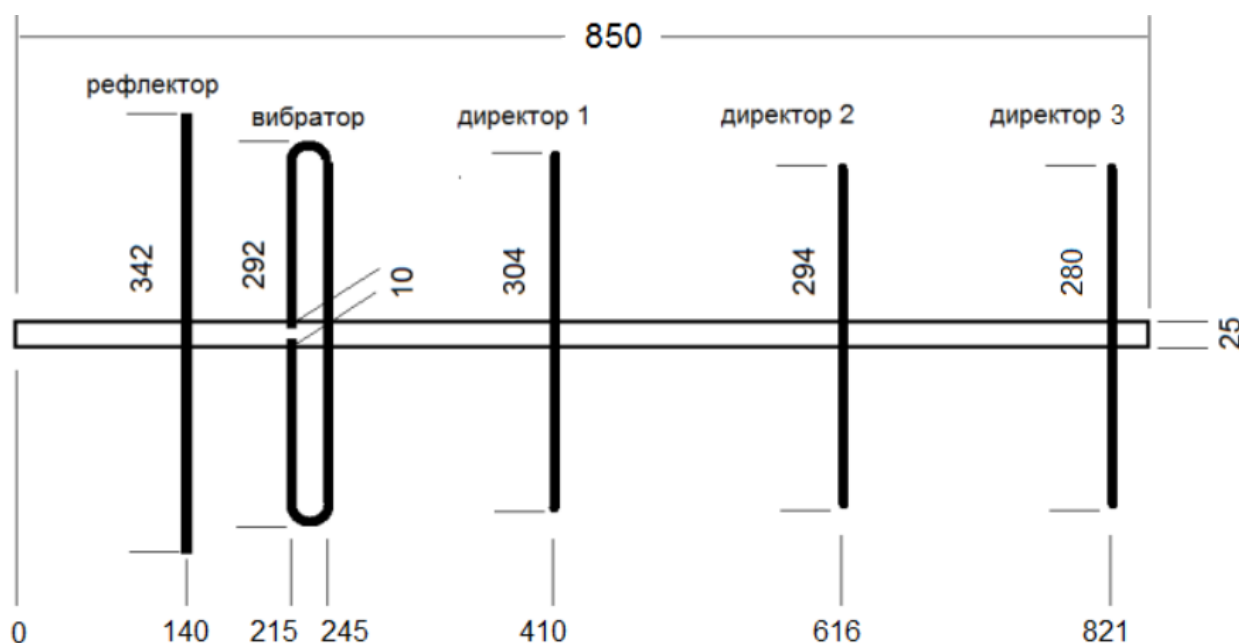


Рис. 2. Схема 5-элементной направленной антенны

Fig. 2. 5-element directional antenna circuit

Так, задавая частоту антенны f , длину антенны L как набор значений 0,3, 0,5, 0,7 и меняя отношение пропорции S/λ как набор значений 0,05, 0,1, 0,2, 0,4, 0,5, рассчитываются геометрические и

частотные характеристики антенны-пушки.

В сводной таблице 2 показаны расчетные базовые характеристики антенны для частоты $f = 2,4$ ГГц.

Таблица 2. Базовые характеристики антенны на частоте $f = 2,4$ ГГц**Table 2.** Basic antenna performance at $f = 2,4$ GHz

Частота, Гц	2400000000				
Длина антенны, м	0,3	0,5	0,7	0,9	1
Коэффициент замедления	1,208	1,125	1,089	1,069	1,063
КНД	17,28	28,8	40,32	51,84	57,6
Соотношение между периодом повторения и длиной волны равно 0,2					
Период	0,125				
Количество дисков	12	20	28	36	40
Радиус диска, м	0,012	0,008	0,006	0,005	0,005
Соотношение между периодом повторения и длиной волны равно 0,5					
Период	0,0625				
Количество дисков	4,8	8	11,2	14,4	16
Радиус диска, м	0,012	0,008	0,007	0,006	0,005
Соотношение между периодом повторения и длиной волны равно 0,1					
Период	0,0125				
Количество дисков	24	40	56	72	80
Радиус диска, м	0,012	0,008	0,007	0,006	0,006
Соотношение между периодом повторения и длиной волны равно 0,3					
Период	0,0375				
Количество дисков	8	14	19	24	27
Радиус диска, м	0,011634336	0,008150159	0,006617157	0,005766308	0,005469525
Соотношение между периодом повторения и длиной волны равно 0,4					
Период	0,05				
Количество дисков	6	10	14	18	20
Радиус диска, м	0,012	0,008	0,007	0,006	0,005

Согласно полным данным при $0,1 < L < 1$ (м) с шагом 0,05 м, получен график зависимости коэффициента замедления (стоячей волны), который показывает его уменьшение практически

до оптимального значения [13], что определяет выбор большей длины антенны L при контроле потерь на боковые и задний лепестки в диаграмме направленности (рис. 3).

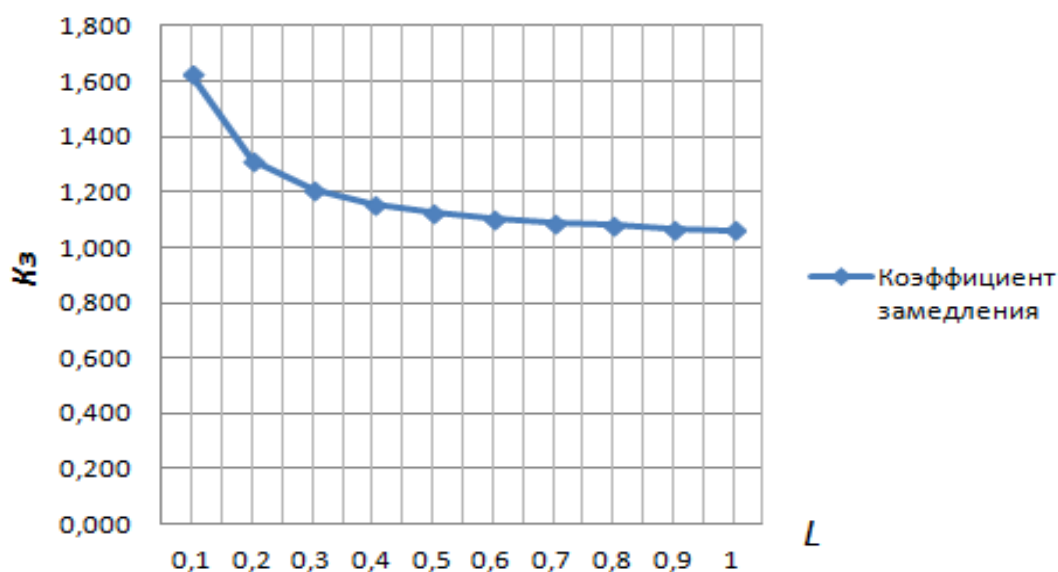


Рис. 3. График зависимости коэффициента замедления от длины L

Fig. 3. Deceleration factor vs. length L plot

При этом значение коэффициента направленного действия D линейно растет с увеличением длины L . Это свойство является следствием конструкции антенны-пушки, имеющей составную структуру в виде пассивных дисков, надетых с фиксированным периодом S на единый стержень антенны.

Принимая во внимание максимальную мощность сигнала 20 дБм и ограниченную дальность связи прямой видимостью, нужно определить максимальную дистанцию для передачи видео высокой чёткости (Full HD) с коптера на наземный пункт управления при эксплуатации в условиях чрезвычайной ситуации в метель [13].

Результаты и их обсуждение

Для проведения расчетов возьмем следующие значения параметров:

– коллинеарные антенны БПЛА и НКУ с коэффициентом усиления 8 дБи в диапазоне 2,4 ГГц;

– кодирование видеоизображения FullHD качества происходит с помощью видеокодера H.265 (HEVC);

– передача видеоизображения осуществляется с применением квадратурной амплитудной модуляцией КАМ-16 (QAM-16) и методов помехоустойчивого кодирования [14].

Мощность сигнала P_R на входе приемника НКУ определяется формулой

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R}{L}, \quad (2)$$

где P_T – эффективно изотропно-излучаемая мощность, Вт; G_T – коэффициенты усиления передающей антенны; G_R – коэффициент усиления приемной антенны; L – энергетические потери сигнала в непрерывном канале связи ($L > 1$).

Мощность шума P_N , приведенная к входу приемника, вычисляется по следующей формуле:

$$P_N = N_0 B, \quad (3)$$

где $N_0 = kT_R$ – односторонняя спектральная плотность мощности шума, дБВт/Гц; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана, Дж/К; T_R – шумовая температура приемника, К; $B = 1/T$ – ширина полосы пропускания приемника при согласованной фильтрации, Гц; T – длительность символа, с.

Шумовая температура приемника НКУ определяется, прежде всего, шумовой температурой антенны, которая определяется по следующей формуле:

$$T_R \approx T_A = 290 \text{ К.} \quad (4)$$

Длительность передаваемого символа определяется по формуле

$$T = r_{FEC} \log_2 M / R, \quad (5)$$

где R – информационная скорость, бит/с; M – позиционность сигнала; r_{FEC} – результирующая кодовая скорость.

Таким образом, с учётом формул (2) – (5) ОШС на входе приёмника НКУ можно выразить следующим образом:

$$h^2 = \frac{P_R}{P_N} = \frac{E_S T}{N_0 B} = P_T G_T G_R \frac{r_{FEC} \log_2 M}{k T_R R L}, \quad (6)$$

где P_R – мощность сигнала; $P_N = N_0 B$ – мощность шума; $E_S = P_R T$ – средняя энергия символа.

Произведем расчет отношения сигнал / шум на входе приемника по следующей формуле [15]:

$$\begin{aligned} h_{[\text{дБ}]}^2 = & 228,6 + P_{T[\text{дБВт}]} + \\ & + G_{T[\text{дБи}]} + G_{R[\text{дБи}]} - 10 \lg T_R - \\ & - 10 \lg \frac{R}{r_{FEC} \log_2 M} - L_{[\text{дБ}]} . \end{aligned} \quad (7)$$

Очевидно, что для гарантии приёма с допустимой вероятностью ошибки P_{b0}

(10^{-6} для видеоинформации) необходимо, чтобы энергетический запас в линии связи Δh^2 превышал запас на общие замирания:

$$\Delta h^2 = h^2 - h_0^2 \geq h_{fad}^2, \quad (8)$$

где h_0^2 – ОШС, которое потенциально обеспечивает заданную вероятность битовой ошибки (пороговое отношение сигнал / шум), дБ; h_{fad}^2 – энергетический запас в линии связи на общие замирания, дБ. Запас на общие замирания примем равным 10 дБ, что применимо к большинству практических случаев.

Для сигналов КАМ-16 (QAM-16) пороговое отношение сигнал / шум составляет 20,6 дБ. Если использовать помехоустойчивое кодирование, то этот показатель может значительно уменьшиться. Например, если применять мощные корректирующие коды, такие как турбокоды Turbo 3/4 ($r_{FEC} = 0,75$) и Turbo 7/8 ($r_{FEC} = 0,875$) пороговое ОШС может быть уменьшено до 13,4 и 14,1 дБ соответственно [16].

Энергетические потери в непрерывном канале передачи рассчитываются по формуле как сумма энергетических потерь в различных условиях:

$$L = L_0 + L_g + L_r + L_p + L_c, \quad (9)$$

где L_0, L_g, L_r, L_p – энергетические потери: в свободном пространстве, в атмосферных газах, в гидрометеорах, из-за поляризационного рассогласования передатчика и приемника, в местах разъёмных соединений и фидере передатчика и приемника, соответственно в дБ.

Энергетические потери в свободном пространстве определяются из выражения [17]

$$L_0 = 10 \lg \left(\frac{4\pi \cdot 10^3 \cdot r}{\lambda} \right)^2 = 92,44 + 20 \lg r + 20 \lg f, \quad (10)$$

где r – длина канала передачи, км; $f = 0,3/\lambda$ – несущая частота сигнала, ГГц; λ – длина волны, м.

График зависимости энергетических потерь в свободном пространстве от расстояния до беспилотного летательного аппарата в диапазоне частот 2,4 ГГц представлен ниже (рис. 4).

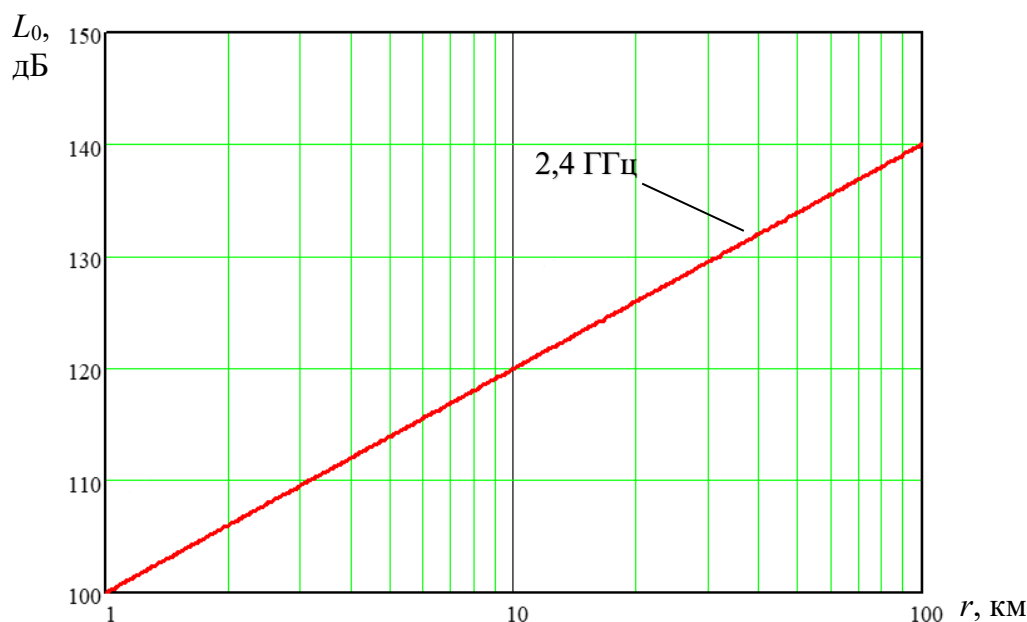


Рис. 4. График зависимости энергетических потерь в свободном пространстве от расстояния между НКУ и БПЛА

Fig. 4. Graph of the dependence of energy losses in free space on the distance between the NKU and the UAV

На основе графика зависимости энергетических потерь в свободном пространстве от расстояния между НКУ и БПЛА (рис. 4) можно сделать вывод, что энергетических потери составляют не более 120 дБ на протяженности до 10 км на частоте 2,4 ГГц.

Неидеальность частотных характеристик приемо-передающего радиотракта управления и приёма данных с БПЛА, пространственное и временное рассеяния сигнала в нерегламентированном

многолучевом канале распространения радиоволн приводят к появлению межсимвольной интерференции, которая является одним из основных факторов, препятствующих приему цифровых сигналов с требуемым качеством. Наиболее остро эта проблема стоит при приеме многопозиционных сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией, широко используемых в высокоскоростных цифровых линиях связи, где уровень межсимвольной помехи, как правило,

соизмерим или превышает уровень аддитивной гауссовской помехи.

Нестационарность многолучевого канала передачи сигнала обуславливает необходимость реализации при приеме сигналов адаптивной фильтрации в его демодуляторном устройстве, а в ряде случаев – и адаптивной поляризационной пространственно-временной обработки сигнала в антенном устройстве системы приема радиосигналов, что позволяет существенно снизить уровень межсимвольных искажений принимаемого сигнала. При этом в качестве критерия адаптации целесообразно использовать критерий минимума среднеквадратической ошибки. Характерной особенностью реализации указанного выше метода компенсации межсимвольных искажений является наличие в выходном сигнале остаточной межсимвольной помехи, которую нельзя характеризовать как аддитивный гауссовский шум, а следовательно, по отношению сигнал / помеха на входе устройства принятия решения однозначно судить о помехоустойчивости приема.

В связи с этим для задания требований к системам радиоприема по подавлению межсимвольных помех при приеме многопозиционных сигналов в нерегламентированном многолучевом канале целесообразно оценить влияние межсимвольной интерференции на помехоустойчивость поэлементного приема, при этом полагая, что устройство принятия решения реализует алгоритм,

оптимальный для канала без межсимвольных искажений.

Потери энергии из-за несоответствия поляризации составляют 3 дБ, а потери, не связанные с распространением радиоволн, равны 1 дБ. Кроме того, существуют потери, вызванные воздействием атмосферных газов и гидрометеоров в диапазоне до 6 ГГц, которыми можно пренебречь, т. к. они на расстоянии до БПЛА 10 км не превышают 0,1 дБ [18].

Графики зависимости энергетического запаса в канале передачи данных между БПЛА и НКУ при передаче видеоизображения FullHD качества в диапазоне 2,4 ГГц с методами кодирования КАМ-16 Turbo 3/4 и 7/8, полученные с использованием формул (7) – (10), представлены ниже (рис. 5).

На основе графиков зависимости энергетического запаса в канале передачи между БПЛА и НКУ можно сделать следующие выводы:

- максимальное расстояние, на которое может передаваться видеоизображение FullHD качества с БПЛА на НКУ методом КАМ-16 Turbo 3/4 на частоте 2,4 ГГц, составляет 3,8 км;
- максимальное расстояние, на которое может передаваться видеоизображение FullHD качества с БПЛА на НКУ методом КАМ-16 Turbo 7/8 на частоте 2,4 ГГц, составляет 3,3 км.

В условиях метели существенное влияние на технические характеристики БПЛА оказывает ветер (табл. 3).

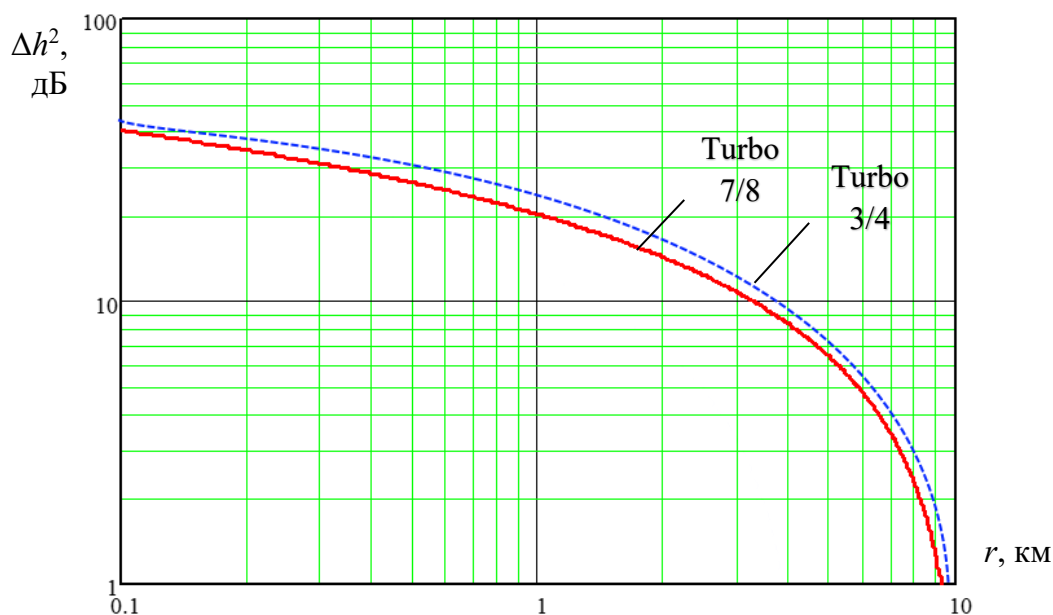


Рис. 5. Графики зависимости энергетического запаса в канале передачи данных между БПЛА и НКУ при передаче видеоизображения FullHD (H.265) качества методом КАМ-16 Turbo 3/4 и 7/8 в диапазоне 2,4 ГГц

Fig. 5. Graphs of the dependence of the energy reserve in the transmission data channel between the UAV and the NKU when transmitting a video image Full HD (H.265) quality by КАМ-16 Turbo 3/4 and 7/8 in the 2.4 GHz band

Таблица 3. Основные параметры интенсивности метели [19]

Table 3. Main parameters of snowstorm intensity [19]

Интенсивность	Скорость ветра, м/с
Слабая	6–10
Обычная	10–20
Сильная	20–30
Очень сильная	30–40
Сверхсильная	40–90

Усиление ветра влияет на параметры БПЛА, такие как: максимальная удаленность БПЛА от НКУ, время функционирования БПЛА без подзарядки (дозаправки), максимальное расстояние, преодолеваемое на одном заряде батареи (топливном баке) [20].

В качестве максимальной удаленности БПЛА от НКУ актуальнее использовать максимальную дальность передачи

видеоизображения FullHD качества с БПЛА на НКУ методом КАМ-16 Turbo 3/4 равное 3,8 км.

Максимальное расстояние, преодолеваемое на одном заряде (топливном баке), зависит от направления ветра, где максимальное возможное расстояние достигается при попутном ветре, а минимальное – при встречном направлении

ветра. Рассчитываем максимальное расстояние по следующей формуле [21]:

$$a = \frac{V \cos \varphi + U \cos \varepsilon}{V}, \quad (11)$$

где V – скорость коптера, км/ч; U – скорость ветра, км/ч; ε – угол воздействия ветра в обычных условиях; φ – угол воздействия ветра в стандартных условиях.

При встречном ветре угол воздействия в обычных условиях на БПЛА

равен 180° , а в стандартных – 0° . При попутном ветре угол воздействия в обычных условиях на БПЛА равен 0° , а в стандартных – 0° .

Графики зависимости максимального расстояния, преодолеваемого на одном заряде (топливном баке), БПЛА от скорости и направления ветра, полученные с использованием выражения (11), представлены ниже (рис. 6).

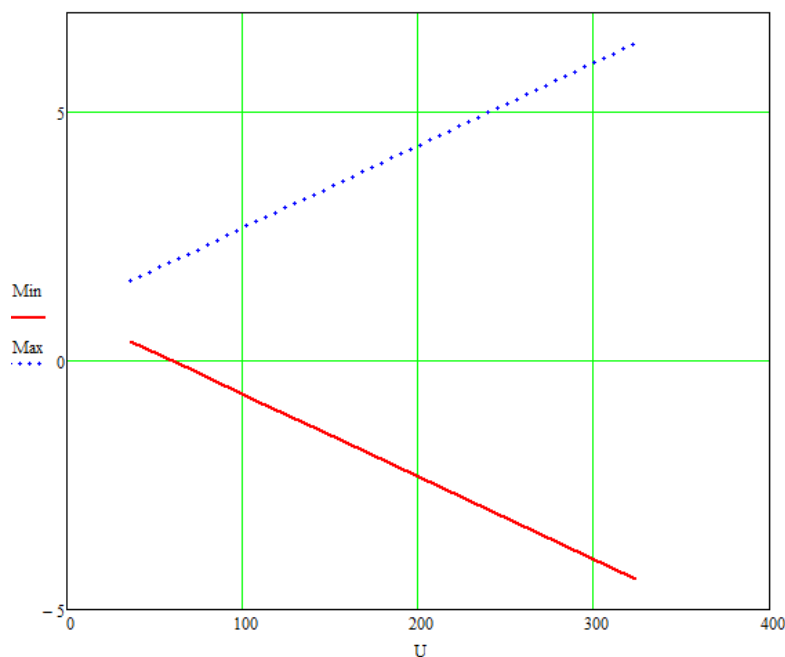


Рис. 6. Графики зависимости максимального расстояния, преодолеваемого на одном заряде (топливном баке), БПЛА от скорости и направления ветра

Fig. 6. Graphs of the dependence of the maximum distance traveled by a single charge (fuel tank) of a UAV on wind speed and direction

Анализ графиков (рис. 6) демонстрирует следующее:

- максимальное расстояние, которое можно преодолеть на одном заряде (топливном баке), при попутном ветре составляет от 1600 до 6400 км при передаче видеоизображения методом КАМ-16 Turbo 3/4;

- максимальное расстояние, преодолеваемое на одном заряде (топливном

баке), при встречном ветре составляет от 0 до 400 км при передаче видеоизображения методом КАМ-16 Turbo 3/4;

- при скорости ветра свыше 60 км/ч (16,7 м/с – средняя интенсивность) использование БПЛА в метель невозможно, поскольку риск авиационных происшествий достигает максимума. [22].

Выводы

Подводя итог вышесказанному, можно сказать, что в данной статье получены следующие результаты:

1. Исследована максимальная дальность канала связи между БПЛА и НКУ, которая определяется прямой видимостью и слабо зависит от высоты подъёма антенны мобильного НКУ. При подъёме БПЛА на высоту от 100 до 500 м этот показатель составляет от 40 до 85 км.

2. Получены графики зависимости энергетического запаса в канале передачи данных между БПЛА и НКУ при передаче видеоизображения FullHD качества методами КАМ-16 Turbo 3/4 и Turbo 7/8.

3. Исследованы максимальные расстояния для передачи видеоизображения

в формате FullHD, которые варьируются от 3,3 до 3,8 км на частоте 2,4 ГГц.

4. Получены графики зависимости максимального расстояния, преодолеваемого на одном заряде (топливном баке), микроБПЛА от скорости и направления ветра.

5. Оценена максимальная скорость встречного ветра, не позволяющая использовать микроБПЛА в условиях метели, которая составляет от 16,7 м/с.

Результаты проведенных исследований в дальнейшем могут стать теоретической базой для последующего проектирования БПЛА разведывательного типа, целевая функция которых заключается в передаче видеоинформации качества FullHD.

Список литературы

1. Колосов П. Удалённый мониторинг водных ресурсов с помощью ИИ и БПЛА // Control Engineering Россия. 2022. № 1 (97). С. 58–59.
2. Костин П. И. Мониторинг лесных пожаров при помощи БПЛА // Вестник науки и образования. 2022. № 1-2 (121). С. 56–58.
3. Кутузов В. И., Андриянов Н. А. Разработка системы связи для систем мониторинга местности с использованием БПЛА // Радиоэлектронная техника. 2019. № 1 (12). С. 176–179.
4. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. 204 с.
5. Зиновьев Е. С., Сатишев Р. П., Павленко С. А. Применение ГИС «Оператор» в комплексах с БПЛА для оперативной обработки и анализа геоинформационных данных // Вестник науки. 2023. Т. 1, № 12 (69). С. 821–829.

6. Попов Н. И., Ефимов С. В. Использование беспилотных летательных аппаратов в МЧС России // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2012. № 1 (1). С. 149–151.
7. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. СПб.: Научные технологии, 2022. 204 с.
8. Особенности построения связи по радиоканалу на современных БПЛА / Б. Э. Дажунц, А. А. Тазетдинов, И. Н. Бабушкин, И. В. Лушпай // Студенческий форум. 2022. № 17-2 (196). С. 65–66.
9. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
10. Довбня В. Г., Азиатцев В. Е., Михайлов С. Н. Помехоустойчивость радиоприемных систем цифровых линий связи: монография / Юго-Западный гос. ун-т. Курск, 2017. 175 с.
11. Старовойтов Е. И. Навигационное обеспечение мониторинга подстилающей поверхности БПЛА с пассивным оптическим датчиком // Радиостроение. 2020. № 5. С. 13–41.
12. Чжоу В., Рентюк В. Использование программно-определяемого радио для передачи видео высокого разрешения в реальном масштабе времени в БПЛА-приложениях // Компоненты и технологии. 2017. № 6 (191). С. 82–87.
13. Основные направления создания высоконадёжной системы связи и управления БПЛА / И. Н. Пантелеймонов, А. В. Белозерцев, А. А. Монастыренко, В. В. Боцва, А. В. Наумкин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 6 (723). С. 78–88.
14. Невзоров Ю. В., Фомина И. А. Управление БПЛА с учётом степени помехозащищённости связи // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2013. № 1-2. С. 44–46.
15. 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.
16. 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.

17. Диденко М. Г. Радиосигналы в спутниковых системах связи // Специальный выпуск. Спутниковая связь и вещание. Технологии и средства связи. 2004. № 5 (44). С. 76–82.
18. Разработка OCDM системы для организации информационного обмена группы БПЛА / Л. Н. Казаков, А. Б. Царев, Н. В. Соловьев, М. И. Махов // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. Т. 9, № 4. С. 51–56.
19. Айрапетов А. Б., Катунин А. В., Тимербулатов А. М. Аэродинамическое проектирование планера многоцелевого микроБПЛА // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2019. Т. 23, № 2 (84). С. 81–89.
20. Игнатов Р. А. Выбор протокола маршрутизации для беспроводной сенсорной сети БПЛА слежения за развитием лесных пожаров // APRIORI. Серия: Естественные и технические науки. 2018. № 3. С. 3.
21. 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.
22. Карцев Н. В., Салыкова О. С. Планирование траектории полёта БПЛА // Образование и наука в современных условиях. 2016. № 1 (6). С. 266–268.

References

1. Kolosov P. Remote monitoring of water resources using AI and UAVs. *Control Engineering Rossiya = Control Engineering Russia*. 2022;(1):58–59. (In Russ.)
2. Kostin P.I. Monitoring forest fires using UAVs. *Vestnik nauki i obrazovaniya = Bulletin of Science and Education*. 2022; (1-2):56–58. (In Russ.)
3. Kutuzov V.I., Andriyanov N.A. Development of a communication system for terrain monitoring systems using UAVs. *Radioelektronnaya tekhnika = Radio-Electronic Engineering*. 2019;(1):176–179. (In Russ.)
4. Makarenko S.I. Countering unmanned aerial vehicles. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii; 2020. 204 p. (In Russ.)
5. Zinoviev E.S., Satishev R.P., Pavlenko S.A. Application of GIS «Operator» in complexes with UAVs for operational processing and analysis of geoinformation data. *Vestnik nauki = Bulletin of Science*. 2023;(12):821–829. (In Russ.)
6. Popov N.I., Efimov S.V. The use of unmanned aerial vehicles in the Ministry of Emergency Situations of Russia. *Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsii = Problems of Ensuring Safety During Liquidation of Consequences of Emergency Situations*. 2016;(1):149–151. (In Russ.)

7. Makarenko S.I. Countering unmanned aerial vehicles. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii; 2022. 204 p. (In Russ.)
8. Dazhunts B.E., Tazetdinov A.A., Babushkin I.N., Lushpay I.V. Features of building radio communications on modern UAVs. *Studencheskii forum = Student Forum*. 2022;(17-2):65–66. (In Russ.)
9. Sklyar B. Digital communication. Theoretical foundations and practical application, 2nd ed. Moscow: Williams; 2003. 1104 p. (In Russ.)
10. Dovbnya V.G., Asiatsev V.E., Mikhailov S.N. Noise immunity of radio receiving systems of digital communication lines. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2017. 175 p. (In Russ.)
11. Starovoitov E.I. Navigation support for monitoring the underlying surface of a UAV with a passive optical sensor. *Radiostroenie = Radio Engineering*. 2020;(5):13–41. (In Russ.)
12. Zhou W., Rentyuk V. Using software-defined radio for transmitting high-resolution video in real time in UAV applications. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*. 2017;(6):82–87. (In Russ.)
13. Panteleimonov I.N., Belozertsev A.V., Monastyrenko A.A., Botsva V.V., Naumkin A.V. Main directions for creating a highly reliable communication and control system for UAVs. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering*. 2020;(6):78–88. (In Russ.)
14. Nevzorov Yu.V., Fomina I.A. Control of UAVs taking into account the degree of communication noise immunity. *Sistemy i sredstva svyazi, televideniya i radioveshchaniya = Systems and Means of Communication, Television and Radio Broadcasting*. 2013;(1-2):44–46. (In Russ.)
15. Alempyev M.Yu., Koptev D.S., Dovbnya V.G., Skripkina E.V. Estimation of the transmission range of video information of various quality when monitoring emergency situations from an unmanned aerial vehicle. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vy-chislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;13(2):31–44. (In Russ.)
16. Sorokin I.A., Romanov P.N., Kondranenkova T.E., Ruzhiev V.A., Stenina N.A., Pushkarenko N.N. Research of permutation decoding algorithms in UAV control systems. *Agrarnaya nauka = Agricultural Science*. 2022;(11):133–140. (In Russ.)
17. Didenko M.G. Radio signals in satellite communication systems. *Sputnikovaya svyaz' i veshchanie. Tekhnologii i sredstva svyazi = Satellite Communications and Broadcasting*, 2004;(5):76–82. (In Russ.)

18. Kazakov L.N., Tsarev A.B., Solovyov N.V., Makhov M.I. Development of an OCDM system for organizing information exchange of a group of UAVs. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov = Systems for Synchronization, Generation and Signal Processing*. 2018;9(4):51–56. (In Russ.)
19. Airapetov A.B., Katunin A.V., Timerbulatov A.M. Aerodynamic design of a multi-purpose micro-UAV airframe. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*. 2019;23(2):81–89. (In Russ.)
20. Ignatov R.A. Selection of a routing protocol for a wireless UAV sensor network for monitoring the development of forest fires. *APRIORI. Ceriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki = APRIORI. Series: Natural and Technical Sciences*. 2018;(3):3. (In Russ.)
21. Sushchenko O.A., Bezkorovayny Yu.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.)
22. Kartsev N.V., Salykova O.S. Planning the flight path of a UAV. *Obrazovanie i nauka v sovremennykh usloviyakh = Education and Science in Modern Conditions*. 2016;1(6):266–268. (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

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

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

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

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@mai

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

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

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-40-59>



УДК 004.056.53

Методы противодействия атакам и организации выбора средств защиты каналов при управлении авиационными робототехническими устройствами

А. В. Хмелевская¹, И. Г. Бабанин¹✉, А. Е. Севрюков¹,
А. И. Николаенко, Е. Ю. Бабанина, А. А. Севрюков²

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305000, Российская Федерация

² Общество с ограниченной ответственностью «Эдвансед Трансформейшн Консалтинг»
ул. Большая Новодмитровская, д. 14/7, г. Москва 127015, Российская Федерация

✉ e-mail: babanin_ivan@bk.ru

Резюме

Цель исследования – выявление организационных и технических методов противодействия атакам на командно-телеметрические линии передачи данных между авиационными робототехническими устройствами и наземными пунктами управления, а также формирование комплексной защиты информации рассматриваемых каналов связи.

Методы. В научной статье обоснованы методы смягчения и противодействия атакам на физическом уровне модели взаимодействия открытых систем ISO/OSI для организации связи по протоколу MAVLINK с целью управления авиационными робототехническими устройствами (помехоустойчивое кодирование с высокой скоростью кода (на примере наиболее распространенного кода – Витерби), метод расширения спектра скачкообразной перестройкой частоты (FHSS), метод передачи с расширенным спектром прямой последовательности (DSSS), технология множественного входа и множественного выхода (MIMO)). Обозначен метод организации выбора средств защиты и противодействия при управлении авиационными робототехническими устройствами, который заключается в оценке рисков и последствий реализации уязвимостей с целью внедрения контрмер там и в таком количестве, чтобы они имели наибольшую пользу.

Результаты. В статье рассмотрены основные возможности по преднамеренному помеховому воздействию на каналы управления и передачи данных потребительских авиационных робототехнических устройств, рассмотрен алгоритм оценки риска «уход с маршрута»; приведен вариант оценки риска применительно к риску схода летательного аппарата с маршрута с указанием названия атаки, ее вероятности, воздействия и возникающего риска, а также приемлемость этого риска и рекомендации относительно срочности его смягчения; представлены рекомендации контрмер в соответствии с приемлемостью вероятности и воздействия; описано соотношение риска и контрмер, применяемых для снижения несанкционированного воздействия, в соответствии с весовыми коэффициентами.

Заключение. В научной статье рассмотрены основные методы противодействия атакам и несанкционированного доступа при управлении автономными робототехническими устройствами. Рассмотрены коэффициенты рисков атак и предпринимаемых контрмер.

Ключевые слова: авиационное робототехническое устройство; криптозащита информации; каналы управления; несанкционированный доступ; оценка рисков.

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

Для цитирования: Методы противодействия атакам и организации выбора средств защиты каналов при управлении авиационными робототехническими устройствами / А. В. Хмелевская, И. Г. Бабанин, А. Е. Севрюков, А. И. Николаенко, Е. Ю. Бабанина, А. А. Севрюков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 14, № 2. С. 40–59. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-40-59>

Поступила в редакцию 07.04.2024

Подписана в печать 03.05.2024

Опубликована 28.06.2024

Methods of countering attacks and organizing the choice of channel protection tools when controlling aviation robotic devices

Alena V. Khmelevskaya¹, Ivan G. Babanin¹✉, Aleksandr E. Sevryukov¹,
Anton I. Nikolaenko¹, Ekaterina Y. Babanina¹, Anton A. Sevryukov²

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

² Limited Liability Company "Advanced Transformation Consulting"
14/7 Bolshaya Novodmitrovskaya Str., Moscow 127015, Russian Federation

✉ e-mail: babanin_ivan@bk.ru

Abstract

The purpose of the research is identification of organizational and technical methods of countering attacks on command and telemetry data transmission lines between aviation robotic devices and ground control points, as well as the formation of comprehensive information protection of the communication channels under consideration.

Methods. The scientific article substantiates methods for mitigating and countering attacks at the physical level of the ISO/OSI open systems interaction model for organizing communication using the MAVLINK protocol for the purpose of controlling aviation robotic devices (noise-resistant coding with a high code rate (using the example of the most common code - Viterbi), extension method Frequency Hopping Spectrum (FHSS), Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS), Multiple Input Multiple Output (MIMO) technology). A method for organizing the selection of protection and countermeasures when controlling aviation robotic devices is outlined, which consists of assessing the risks and consequences of the implementation of vulnerabilities in order to introduce countermeasures there and in such quantities that they have the greatest benefit.

Results. The article discusses the main possibilities for intentional interference on the control and data transmission channels of consumer aviation robotic devices, an algorithm for assessing the risk of "leaving the route" is considered; a risk assessment option is provided in relation to the risk of an aircraft going off route, indicating the name of the attack, its likelihood, impact and resulting risk, as well as the acceptability of this risk and recommendations regarding the urgency of mitigating it; recommendations for countermeasures are presented in accordance with the acceptability of likelihood and impact; describes the relationship between risk and countermeasures used to reduce unauthorized exposure, in accordance with weighting coefficients.

Conclusion. The scientific article discusses the main methods of countering attacks and unauthorized access when controlling autonomous robotic devices. The risk coefficients of attacks and countermeasures taken are considered.

Keywords: aviation robotic device; cryptographic information protection; control channels; unauthorized access; risk assessment.

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

For citation: Khmelevskaya A.V., Babanin I.G., Sevryukov A.E., Nikolaenko A.I., Babanina E.Y., Sevryukov A.A. Methods of countering attacks and organizing the choice of channel protection tools when controlling aviation robotic devices. *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;14(2):40–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-40-59>.

Received 07.04.2024

Accepted 03.05.2024

Published 28.06.2024

Введение

На сегодняшний день применение авиационных робототехнических устройств позволяет решить наиболее острые и актуальные проблемы. В их числе и экономические, и экологические, и другие потребности, с которыми связано большинство отраслей во всем мире. Применение авиационных робототехнических устройств позволяет производить осмотр магистральных линий электропередач, производить мониторинг местности, осуществлять разведку и в целом выполнять ряд важнейших задач. Однако на данный момент остро стоит вопрос о стандартизации данной отрасли, поскольку существующие стандарты ориентируются в основном лишь на проблематике безопасности полетов.

Существующий на данный момент Международный стандарт ISO 21384-3:2019(E) предписывает внедрение в качестве основной системы практику управления безопасностью полетов вне зависимости от подвида применяемых авиационных робототехнических устройств. Данное направление подразумевает использование всех существующих на сегодняшний день мер обеспечения

информационной безопасности в полном контексте использования летательного аппарата [1].

В основе работы многих современных авиационных робототехнических устройств лежит принцип обмена информацией с наземными пунктами управления (НПУ), который во многих случаях осуществляется в соответствии с принципами протокола MAVLink. Однако при этом выявляется существенный недостаток использования данного протокола – вопрос обеспечения защиты передаваемой информации, поскольку MAVLink не предполагает использования никакой защиты передаваемых данных, что влечет за собой риски перехвата и взлома передаваемых данных. Данный протокол не предполагает использования методов аутентификации и идентификации, т. е., по сути, связь между авиационным робототехническим устройством и НПУ осуществляется по незащищенному и незашифрованному каналу связи. Таким образом, высока вероятность несанкционированного воздействия третьих лиц на полетное задание авиационного робототехнического устройства и в целом его поведение, а также и перехват заданий для робототехнического устройства. Альтернативой применению

MAVLink является использование его модернизированной версии – протокола MAVSec, который обладает механизмами криптозащиты [2]. Особенно остро стоит вопрос о несанкционированном воздействии на программу выполнения заданий во время полета авиационного робототехнического устройства. Например, создается угроза возникновения уязвимости, суть которой заключается в возможности вставки вредоносного кода в алгоритм работы авиационного робототехнического устройства непосредственно во время полета (данное воздействие может иметь самые различные последствия) от некорректного поведения аппарата до полной потери авиационного робототехнического устройства. Для смягчения угроз от «площадных» помех и эффективного противодействия им программа, контролирующая полет, может использовать систему, в основе которой лежит принцип обнаружения вторжений (IDS). Эта система, как правило, представляет собой программно-аппаратное обеспечение, которое отслеживает аномалии и отклонения в системе [3].

IDS для предотвращения неправильного использования работает с заранее определенными сигнатурами атак, которые нацелены на уязвимые точки системы безопасности. Эти сигнатуры хорошо известны и используются в качестве шаблонов для сравнения.

IDS для обнаружения аномалий сравнивает текущую производительность системы с ее обычной производительностью, сформированной на основе

статистики. Если система показывает отклонения от своей обычной производительности, IDS регистрирует это поведение. IDS также идентифицирует входящий трафик, определяя, нуждается ли он в защите, и использует для этого три различных типа информации. К данным типам относятся:

- информация, имеющая долгосрочных характер;
- информация, включающая данные о текущей конфигурации системы;
- информация текущего аудита авиационного робототехнического устройства.

К первому типу информации, а именно к долгосрочной информации, следует отнести создание базы данных методов обнаружения атак. Ко второму типу, соответственно, следует отнести информацию по текущему состоянию системы. Аналогично конфигурационной информации, информация аудита соответственно также отражает состояние системы в данный момент, при этом систематизируя данные аудита и текущее состояние системы, возможно, определение, обнаружены ли признаки несанкционированного вторжения или нет. Далее соответственно предпринимаются действия для возврата системы авиационного робототехнического устройства в наиболее безопасное в данной ситуации состояние.

Оптимальное управление правилами осуществляется с использованием критериев приоритета. В основе каждого правила лежит принцип формирования

не на одном лишь состоянии авиационного робототехнического устройства, а на совокупности состояний, которые предполагают наличие как состояний с безопасным и нормальным поведением, так и с состояниями, которые могут возникнуть в результате несанкционированного воздействия на робототехническое устройство.

Таким образом, формируемые правила имеют в своем составе целый набор состояний, которые указывают, находится ли аппарат в безопасном режиме или подвержен несанкционированному воздействию, которое не описано в данном правиле.

Материалы и методы

Преднамеренное помеховое воздействие на каналы управления и передачи данных потребительских авиационных устройств не имеет широкого распространения среди злоумышленников и малоэффективно в реальных ситуациях из-за ряда особенностей реализации такого воздействия, а также благодаря существующим методам повышения помехозащищённости каналов.

К особенностям реализации воздействий относятся:

- преднамеренное воздействие осуществимо лишь при условии соблюдения электромагнитной доступности авиационного робототехнического устройства [4];

- в режиме «радиомолчания» или при автономном движении робототехнического устройства по заранее запрограммированной траектории приём и

анализ радиоэлектронного взаимодействия устройства крайне затруднён или невозможен;

- энергетическая эффективность средств воздействия убывает пропорционально квадрату расстояния;

- «площадные» заградительные помехи эффективно подавляют несколько каналов управления и навигации. Однако их использование с БПЛА, которые в своем рабочем состоянии используют широкополосные сигналы и сигналы с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты, может быть менее эффективным из-за снижения энергетической эффективности [5];

- помехи, основной замысел которых заключается в частотной и структурной идентификации сигналов, имеющие наибольший эффект в целях несанкционированного воздействия на авиационное робототехническое устройство, которые имеют своей целью искажение полетного задания, в т. ч. отправка фиктивных команд для нарушения полетного задания авиационного устройства или режима работы в целом, требуют либо изначального вскрытия структуры сигналов и формата команд авиационного робототехнического устройства, либо заблаговременного перехвата баз данных соответствующих команд, используемых при работе с авиационным аппаратом [6];

- характер движения авиационного устройства существенно влияет на эффективность радиоэлектронного воздействия со стороны статичного средства

злоумышленника (складки местности, здания, полёт на низкой высоте);

– ограниченность в энергетических ресурсах и ресурсах времени воздействия на летательных аппарат, полёт которого, в свою очередь, ограничен рамками сессии (порядка 40–50 мин).

К существующим методам помехозащищённости каналов управления и передачи относятся нижеприведённые.

Применение помехоустойчивого кодирования с высокой скоростью кода.

Для решения вопроса оценка вклада помехоустойчивого кодирования в проблему, связанную с улучшением криптозащищённости радиотрассы связи с авиационным аппаратом, проводилась с использованием анализа значения вероятности ошибки на бит на входе ($P_{b \text{ in Vit}}$) и на выходе декодера Витерби ($P_{b \text{ out Vit}}$). Данные значения для райсовской и рэлеевской радиотрассы для кодовых скоростей $R = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$ для сигнала КАМ-64 представлены ниже (рис. 1).

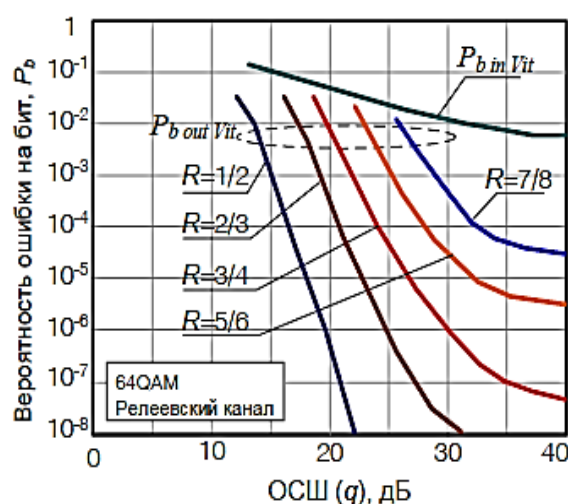
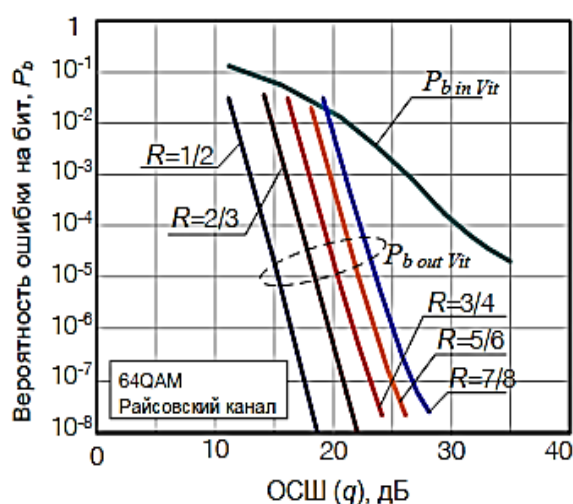


Рис. 1. Значения вероятности возникновения битовой ошибки от скорости кодирования [7]

Fig. 1. Bit error probability as a function of encoding speed [7]

Применение метода расширения спектра скачкообразной перестройкой частоты (FHSS) основано на периодическом изменении несущей частоты сигнала. Хотя в любой данный момент передатчик работает как простой узкополосный передатчик, по прошествии заданного времени частота изменяется, вызывая перемещение несущего информацию сигнала. Несущая частота перемещается дискретными шагами, или скачками, в пределах заданной полосы

частот, и конечный результат состоит в том, что в течение определенного периода времени передача распространяется по широкой полосе частот или спектру. Если существует вероятность того, что узкополосный передатчик создаст помехи, то с течением времени этот узкополосный передатчик остается на фиксированной частоте, а передача полезного сигнала перемещается на другую несущую частоту псевдослучайным образом. Для создания широкополосной

помехи, способной вызвать недопустимое количество битовых ошибок для канала передачи БПЛА, требуется большие ресурсы энергии.

Метод передачи с расширенным спектром прямой последовательности (DSSS) – это принципиально другой метод, используемый в ситуациях, подверженных помехам. Он использует схему для свертывания потока данных с помощью кода расширения. Метод противодействует помехам, смешивая сигнал данных с PN кодом, шумоподобной последовательностью битов или элементарных посылок со значениями 0 и 1. Результирующая ширина полосы сигнала становится намного больше («расширенный спектр»). Приемная система применяет тот же PN код к принятому сигналу для извлечения / декодирования информации. Суть этого метода расширения заключается в том, что несущая частота остается фиксированной, в то время как передаваемый сигнал расширяется. Передатчик работает не с битовой скоростью цифровой информации, а с более высокой битовой скоростью, связанной с кодированным сигналом. Это приводит к увеличению энергии бокового лепестка по мере увеличения размера расширяющегося PN кода. Чем больше битов добавляется к коду расширения, тем больше энергии передается в боковые лепестки, тем самым уменьшая амплитуду любого отдельного лепестка. При определенном коде расширения можно понизить энергию в любом одном боковом лепестке до уровня ниже

минимального уровня шума анализатора спектра.

Технология множественного входа и множественного выхода (MIMO) относится к технологии беспроводной связи, которая передает сигналы через несколько антенн на передающей стороне и принимает сигналы через несколько антенн на принимающей стороне. MIMO в сочетании с технологией мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов и пространственно-временное кодирование могут реализовать пространственное разнесение, временное разнесение и частотное разнесение, тем самым реализуя антиинтерференцию в пространственной, временной и частотной области [8].

Риски нежелательного воздействия на летательный аппарат могут возникать на каждом этапе полётной миссии. Риски, возникающие во время полета, обычно находятся в центре внимания из-за возникающей угрозы безопасности, однако риски до полёта или после полёта не менее важны.

Предполетные риски включают приобретение, сборку и настройку аппаратного и программного обеспечения авиационного робототехнического устройства, а также применение различных веб-приложений, которые представляют собой угрозы как безопасности, так и конфиденциальности.

Риски после полета включают обработку данных и соответствующую инфраструктуру хранения, которая может угрожать конфиденциальности.

Систематизация рабочего процесса помогает определить и спланировать миссию. Следовательно, разработка такого метода организации рабочего процесса может способствовать снижению технического риска ещё до его реализации извне [9].

Стандарты, специфичные для предметной области, часто не учитывают сдвиг в сторону программных возможностей или явно не подчеркивают соответствующие риски информационной безопасности, возникающие при реализации таких функций в программном обеспечении. Зачастую стандарты не содержат ссылок на количественные процедуры, которые могут обеспечить желаемые возможности поддержки принятия решений.

Существует необходимость в простых количественных процедурах для оценки рисков, сравнения эффективности мер противодействия и передачи связанных результатов.

Основная идея организации выбора методов защиты, противодействия и смягчения последствий заключается в следующем: оценка рисков и последствий реализации уязвимостей для внедрения контрмер там и в таком количестве, чтобы они имели наибольшую пользу.

Концептуальный подход к количественной оценке риска летательного аппарата и объективная стратегия снижения риска посредством усовершенствования технологии или контрмер графически представлены ниже (рис. 2).

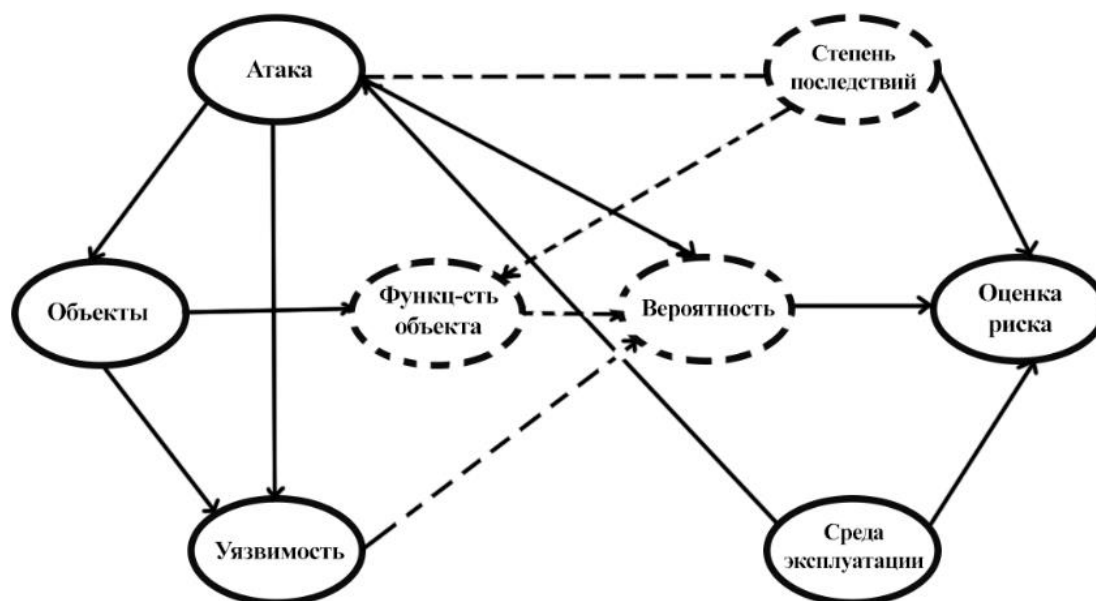


Рис. 2. Схема количественной оценки рисков воздействия на летательный аппарат [10]

Fig. 2. A scheme for quantifying the risks of exposure to an aircraft [10]

На рисунке 2 присутствует восемь узлов, а также соответствующие отношения между ними. Объекты функционала БПЛА предоставляют его функциональные возможности. Однако эти же

объекты функционала также обладают уязвимостями. Атаки нацелены на объекты функционала через его уязвимости. Атаки происходят в среде эксплуатации и успешны с определенной вероятностью,

приводя к последствиям определенной степени серьезности. Наконец среда эксплуатации, вероятность возникновения и степень последствий вносят вклад в оценку риска [11].

Вероятность возникновения воздействия на объект функционала и степень (тяжесть) последствий служат основой для предварительных формулировок количественной оценки риска.

Организация выбора методов и средств управления рисками требует

выявления рисков и их потенциальных последствий. Только тогда можно определить стратегию снижения этих рисков.

На рисунке 3 проиллюстрирована схема алгоритма (полетное задание – оценка рисков при выполнении – решение возникших аспектов – выполнение / невыполнение задания) оценки риска «Уход с маршрута», когда одна из нескольких атак заставляет авиационное устройство нарушить полетную миссию [12].

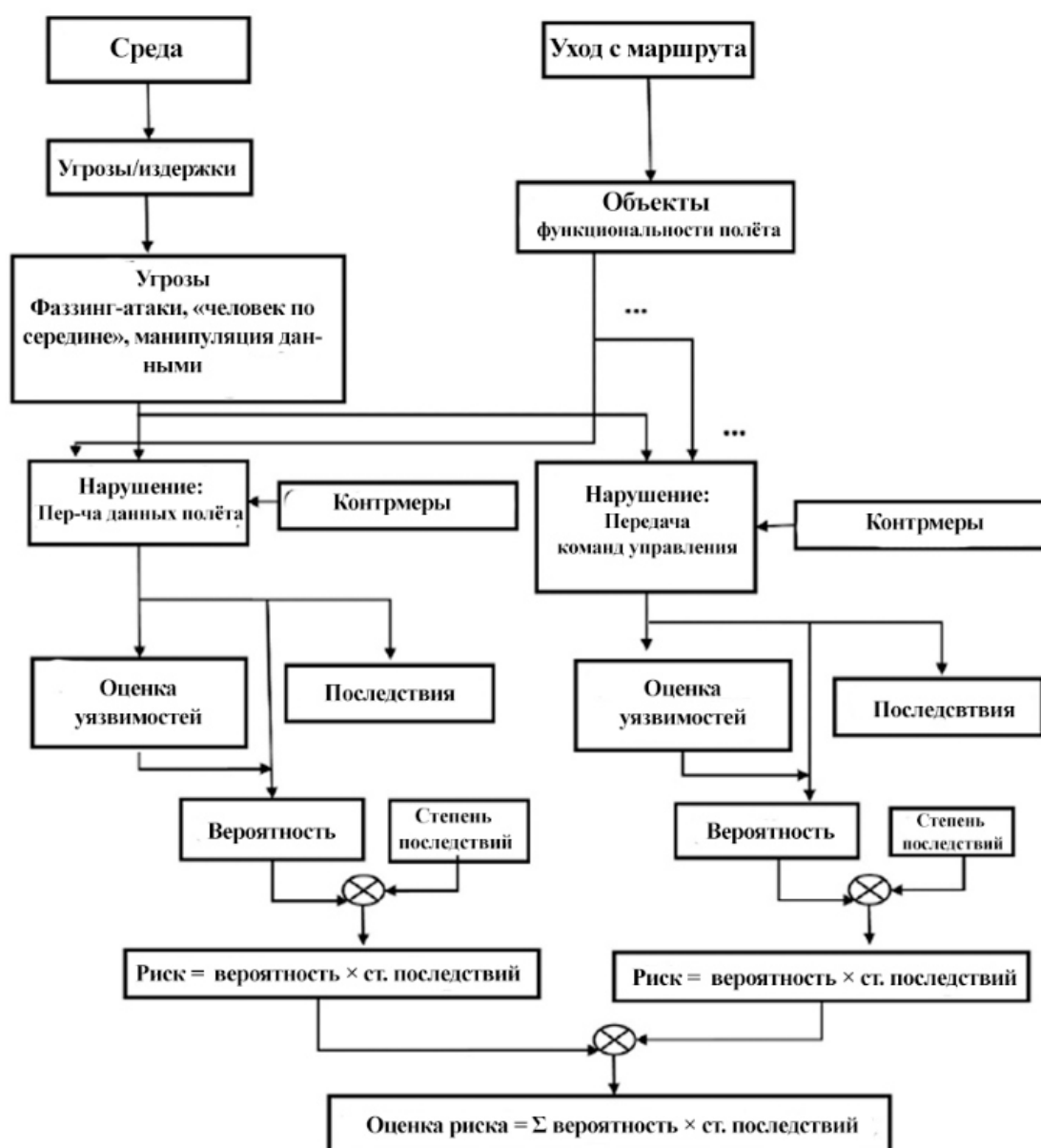


Рис. 3. Алгоритм оценки риски «Уход с маршрута»

Fig. 3. Risk assessment algorithm "Leaving the route"

Контрмеры различной сложности и стоимости могут снизить уязвимость и последствия атаки, что может снизить вероятность успеха атаки, а также ее воздействие и соответствующую серьезность. Традиционные модели риска определяют риск как произведение вероятности и времени воздействия [13].

Поскольку точные вероятности рисков трудно определить и вычислить,

вводится пятиуровневая матрица вероятностей рисков и их словесное кодирование (часто (Д), случайное (Г), маловероятно (В), практически невероятно (Б) и крайне маловероятное (А)). Таким образом, при таком подходе оценка упрощается до категорий, чтобы способствовать принятию решения и его имплементации (табл. 1).

Таблица 1. Пятиуровневая система классификации и кодирования

Table 1. Five-level classification and coding system

Степень последствий	5	5А	5Б	5В	5Г	5Д
	4	4А	4Б	4В	4Г	4Д
	3	3А	3Б	3В	3Г	3Д
	2	2А	2Б	2В	2Г	2Д
	1	1А	1Б	1В	1Г	1Д
		А	Б	В	Г	Д
		Вероятность				

Аналогичным образом по пятиуровневой системе классифицируется и кодируется степень последствий (чрезвычайно высокий уровень (5), высокий (4), средний (3), низкий (2) и чрезвычайно низкий (1)). Однако, как указывалось ранее, это также может быть скорректировано в соответствии с потребностью и практикой взаимодействия с летательным аппаратом [14].

Предполагая, что риски нарушения функционала являются взаимоисключающими, можно суммировать оценки рисков для каждого нарушения, чтобы получить Риск («Уход с маршрута») = $\sum$ «Вероятность» $\times$ «Степень воздействия», включая

каждую угрозу, специфичную для этого риска [15].

В таблице 2 приведены пример оценки риска применительно к риску схода авиационного робототехнического устройства с маршрута с указанием названия атаки, ее вероятности, воздействия и возникающего риска, а также приемлемость этого риска и рекомендации относительно срочности его смягчения. Вероятность и воздействие зависят от конкретной выполняемой миссии, поэтому для иллюстрации были присвоены условные значения.

В таблице 3 представлены рекомендации в соответствии с приемлемостью вероятности и воздействия.

Таблица 2. Оценки риска применительно к риску схода авиационного робототехнического устройства с маршрута**Table 2.** Risk assessments in relation to the risk of an aircraft robotic device going off the route

Атака	«Вероятность»	Степень последствий	Риск	Приемлемость	Рекомендации
«Человек посередине»	3	2	6	Удовлетворительно	Использование лучших практик
Глушение канала связи	3	3	9	Неприемлемо	Требуется немедленное смягчение последствий
Глушение GNSS	3	2	6	Удовлетворительно	Использование лучших практик
Атака повторного воспроизведения	3	5	15	Допустимо	Никаких действий не требуется
Обман сенсоров	3	2	6	Неприемлемо	Требуется немедленное смягчение последствий
Глушение сенсоров	3	2	6	Удовлетворительно	Использование лучших практик

Таблица 3. Рекомендации контрмер [16]**Table 3.** Recommendations of countermeasures [16]

Приемлемость	Вероятность и степень последствий	Рекомендации контрмер
Неприемлемо	3-5Г	Требуется немедленные действия по смягчению и эскалации последствий. Следует рассмотреть возможность оперативной остановки
Удовлетворительно	4-5А, 3-5Б, 1-5В, 1-2Г	Риск должен быть минимизирован, насколько это практически возможно, при условии соблюдения формального процесса утверждения
Допустимо	1-3А, 1-2Б	Никаких действий не требуется

В таблице 4 на примерах для ясности обобщена информация об атаках, рисках и контрмерах. Коэффициентам присвоены условные значения, так как вероятность (V_i), степень последствий (P_i), весовой коэффициент контрмеры

(KP_i) и стоимость имплементации (K_c) зависят от выполняемой миссии и могут быть скорректированы в соответствии с потребностью и практикой применения летательного аппарата [17].

Таблица 4. Коэффициенты рисков, атак и контрмер [16]**Table 4.** Coefficients of risks, attacks and countermeasures [16]

Атака (A_i)		B_i	Π_i	Риск	Контрмеры (K_i)		$K\Pi_i$	K_c
A1	Внедрение ложных данных	3	4	12	K1	Сверка метаданных и актуальных данных	-1	10
A2	Воздействие на сенсоры через оптический поток	3	3	9	K2	Применение алгоритмов проверки легитимности заземляющей поверхности	-1	5
A3	Глушение канала ЛА-НПУ	3	2	6	K3, K4	Измерение мощности сигнала, смена канала	-2	1
A4	Атаки «человек посередине»	3	5	15	K5	Применение защищённых протоколов	-2	5
A5	Глушение GNSS	3	2	6	K6	Применение SoS- и DoA-детекторов	-1	15
A6	Dos-, ARP-атаки	3	1	3	K7	Применение сторожевого таймера, строгая фильтрация данных, защита точки доступа	-2	1
Суммарный коэф. риска				51				

Цель состоит в том, чтобы определить контрмеры (табл. 2), которые снижают риск до приемлемого уровня, для достижения уровня принятия рисков (табл. 3, 4).

Без назначенных контрмер базовый риск схода с маршрута равен

$P_0 = (4 \cdot 3) + (3 \cdot 3) + (3 \cdot 2) + (3 \cdot 5) + (3 \cdot 2) + (3 \cdot 1) = 51$, в то время как применение контрмеры, например K5, снижает риск до $P(K2) = (4 \cdot 3) + (3 \cdot 3) + (3 \cdot 2) + ((3-2) \cdot 5) + (3 \cdot 2) + (3 \cdot 1) = 45$.

А эффективное соотношение риска и затрат составляет

$$PK2 = \frac{P_0 - PK5}{K_c} = \frac{51 - 45}{5} = 1,2.$$

Аналогичным образом определяется снижение риска для других контрмер: $P(K1) = 48$, $P(K2) = 48$, $P(K3) = 48$, $P(K4) = 45$, $P(K6) = 48$ и $P(K7) = 45$.

В таблице 5 показано соотношение риска и стоимости всех контрмер [18].

Таблица 5. Соотношение риска и стоимости контрмер**Table 5.** The ratio of risk and cost of countermeasures

Контрмера	Соотношение
K5	1,2
K1	0,3
K2	0,6
K3	3
K4	6
K6	0,2
K7	6

И мера К4, и мера К7 имеют одинаковое соотношение. Однако атака А3 имеет большую степень последствий, чем атака А6, поэтому для противодействия А3 выбирается мера К4. Затем соотношения пересчитываются с новым базовым уровнем общего риска 45 [19].

На рисунке 4 показана функциональная зависимость общего риска при выполнении полетного задания от совокупной стоимости контрмер для избежания несанкционированного воздействия [20].

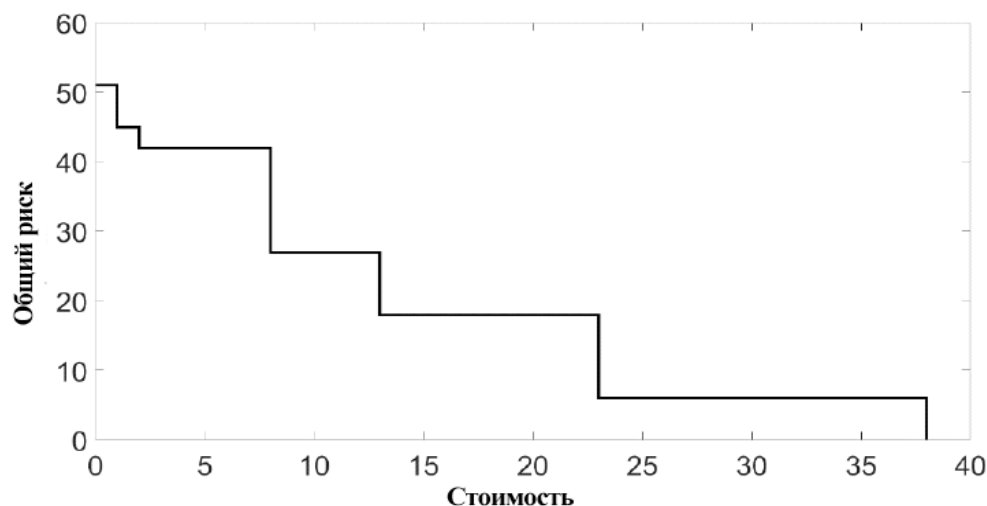


Рис. 4. Функциональная зависимость общего риска при выполнении полетного задания от совокупной стоимости контрмер для избежания несанкционированного воздействия

Fig. 4. Functional dependence of the overall risk in the performance of a flight mission on the total cost of countermeasures to avoid unauthorized exposure

Результаты и их обсуждение

В соответствии с поставленными целями:

- рассмотрены основные возможности по преднамеренному помеховому воздействию на каналы управления и передачи данных потребительских авиационных робототехнических устройств;

- рассмотрен алгоритм оценки риска «уход с маршрута»;

- приведен вариант оценки риска применительно к риску схода летательного аппарата с маршрута с указанием названия атаки, ее вероятности, воздействия и возникающего риска, а также приемлемость этого риска и

рекомендации относительно срочности его смягчения;

- представлены рекомендации контрмер в соответствии с приемлемостью вероятности и воздействия;

- описано соотношение риска и контрмер, применяемых для снижения несанкционированного воздействия, в соответствии с весовыми коэффициентами.

Выводы

Рассмотренный подход позволяет лицу, принимающему решение, определить риск, достижимый в рамках определенного бюджета, или затрат, необходимых для достижения желаемого уровня риска. Рассмотренный подход может

служить ориентиром при выборе контрмер, а также при обосновании вспомогательного бюджета для таких контрмер.

По полученным выше данным возможно дальнейшее проектирование системы управления БПЛА с учетом возможных воздействий и применение

соответствующих контрмер. В рамках дальнейших исследований планируется к анализу и разработке система управления полетным заданием для БПЛА с учетом применения возможностей по доставке грузов при рассмотрении воздействий, описанных выше.

Список литературы

1. Лисничук А. А. Процедура многокритериального синтеза OFDM-радиосигналов для снижения пик-фактора и повышения структурной скрытности систем передачи информации // Вестник Рязанского радиотехнического университета. 2021. № 77. С. 17–28.
2. Лисничук А. А., Батищев А. В. Двухкритериальный синтез OFDM-сигналов для повышения энергетической эффективности и помехоустойчивости // Вестник Рязанского радиотехнического университета. 2021. № 76. С. 3–16.
3. Лисничук А. А. Многокритериальный синтез радиосигналов с прямым расширением спектра для адаптивных к узкополосным и структурным помехам систем передачи информации // Цифровая обработка сигналов. 2022. № 1. С. 19–23.
4. Многокритериальный подход к выбору процедуры кодирования телеметрических радиосигналов сложных технических объектов / С. Н. Кириллов, А. А. Лисничук, П. С. Писака [и др.] // Вестник Рязанского радиотехнического университета. 2021. № 75. С. 3–14.
5. Способ реализации криптографической защиты каналов для организации связи по протоколу MavLink при управлении автономными БПЛА / А. В. Хмелевская, А. Е. Севрюков, А. А. Севрюков [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 122–141.
6. Бабанин И. Г., Мухин И. Е., Коптев Д. С. Методологические основы выбора параметров фильтров частотной селекции с учетом эквивалентных энергетических потерь в радиоприёмных устройствах высокоскоростных радиосистем передачи информации: монография / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2020. 136 с.
7. Метод параметрического синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средств радиомониторинга источников радиоизлучения с квадратурной амплитудной модуляцией спутниковых систем связи / И. Г. Бабанин, И. Е. Мухин, Е. Ю. Бабанина, А. В. Хмелевская // Известия Юго-Западного государственного университета.

Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 41–63.

8. Галкин В. А. Основы программно-конфигурируемого радио. М.: Горячая линия – Телеком, 2023. 372 с.

9. 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.

10. Фокин Г. А. Принципы и технологии цифровой связи на основе программно-конфигурируемого радио: обзор современных тенденций в области создания комплекса подготовки специалистов // Труды учебных заведений связи. 2019. № 5(1). С. 78–94.

11. Прототип приемопередающего оборудования скоростной передачи данных в частотном диапазоне 57–64 ГГц / О. В. Болховская, Г. А. Ермолаев, С. Н. Трушков, А. А. Мальцев // Труды учебных заведений связи. 2023. № 9(2). С. 23–39.

12. 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.

13. Фокин Г. А. Принципы и технологии цифровой связи на основе программно-конфигурируемого радио: обзор современных тенденций в области создания комплекса подготовки специалистов // Труды учебных заведений связи. 2019. № 5(1). С. 78–94.

14. Липатников В. А., Петренко М. И. Модель самоорганизующейся сети радиосвязи, функционирующей в сложной сигнально-помеховой обстановке // Труды учебных заведений связи. 2023. № 9(2). С. 72–80.

15. Метод и алгоритм автономного планирования траектории полета беспилотного летательного аппарата при мониторинге пожарной обстановки в целях раннего обнаружения источника возгорания / Р. А. Томакова, С. А. Филист, А. Н. Брежнева [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 1. С. 93–110.

16. Кулешова Е. А., Таныгин М. О. Исследование характеристик современных генераторов псевдослучайных последовательностей // Телекоммуникации. 2023. № 7. С. 28–39.

17. Интеллектуальная система обработки изображений, получаемых с беспилотных летательных аппаратов / С. А. Филист, Р. А. Томакова, Н. Г. Нефедов [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 64–85.

18. Larin S. N., Ermakova I. M. Integrated assessment of innovative software projects quality: a system of indicators // International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2022. N 3-3(66). P. 179–184.

19. Андронов В. Г., Чуев А. А., Князев А. А. Модель параметров отклонений маршрута полёта беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25, № 4. С. 145–161. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-145-161>

20. Использование показателей структуры вибросигнала для решения задач диагностики технического состояния ответственных агрегатов современных летательных аппаратов / И. Е. Мухин, С. А. Тяпкин, Д. С. Коптев, Ю. В. Шуклина // Телекоммуникации. 2023. № 6. С. 2–14. <https://doi.org/10.31044/1684-2588-2023-0-6-2-14>. EDN ZCPQKS

References

1. Lisnichuk A.A. The procedure of multicriteria synthesis of OFDM radio signals to reduce the peak factor and increase the structural secrecy of information transmission systems. *Vestnik Ryazanskogo radiotekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ryazan Radio Engineering University*. 2021;(77):17–28. (In Russ.)

2. Lisnichuk A.A., Batishchev A.V. Two-criterion synthesis of OFDM signals to increase energy efficiency and noise immunity. *Vestnik Ryazanskogo radiotekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ryazan Radio Engineering University*. 2021;(76): 3–16. (In Russ.)

3. Lisnichuk A.A. Multicriteria synthesis of radio signals with direct spectrum expansion for information transmission systems adaptive to narrowband and structural interference. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital Signal Processing*. 2022;(1):19–23. (In Russ.)

4. Kirillov S.N., Lisnichuk A.A., Pisaka P.S., et al. A multi-criteria approach to the choice of the procedure for encoding telemetric radio signals of complex technical objects. *Vestnik Ryazanskogo radiotekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ryazan Radio Engineering University*. 2021;(75); 3–14. (In Russ.)

5. Khmelevskaya A.V., Sevryukov A.E., Sevryukov A.A., et al. A method for implementing cryptographic protection of channels for organizing communication using the MAVLink protocol when controlling autonomous UAVs. *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. 2022;12(4):122–141. (In Russ.)

6. Babanin I.G., Mukhin I.E., Koptev D.S. Methodological foundations for the selection of parameters of frequency selection filters taking into account equivalent energy losses in radio receivers of high-speed radio information transmission systems. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2020. 136 p. (In Russ.)

7. Babanin I.G., Mukhin I.E., Babanina E.Y., Khmelevskaya A.V. Method of parametric synthesis of electromagnetic access systems for radio monitoring of radio sources with quadrature amplitude modulation of satellite communication systems. *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.* 2022;12(4):41–63. (In Russ.)

8. Galkin V.A. Fundamentals of software-configurable radio. Moscow: Goryachaya liniya; 2023. 372 p. (In Russ.)

9. Alempyev M.Y., Koptev D.S., Dovbnya V.G., Skripkina E.V. Evaluation of the transmission range of video information of various quality when monitoring emergency situations from an unmanned aerial vehicle. *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;3(2):31–44. (In Russ.)

10. Fokin G.A. Principles and technologies of digital communication based on software-configurable radio: an overview of current trends in the field of creating a complex of training specialists. *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;5(1):78–94. (In Russ.)

11. Bolkhovskaya O.V., Ermolaev G.A., Trushkov S.N., Maltsev A.A. Prototype of high-speed data transmission equipment in the frequency range 57–64 GHz. *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;9(2):23–39. (In Russ.)

12. Alempyev M.Y., Koptev D.S., Dovbnya V.G., Skripkina E.V. Evaluation of the transmission range of video information of various quality when monitoring emergency situations from an unmanned aerial vehicle. *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(2):31–44. (In Russ.)

13. Fokin G.A. Principles and technologies of digital communication based on software-configurable radio: an overview of current trends in the field of creating a complex of training specialists. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi = Proceedings of Educational Institutions of Communication. 2019;(5):78–94. (In Russ.)*

14. Lipatnikov V.A., Petrenko M.I. A model of a self-organizing radio communication network functioning in a complex signal-interference environment. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi = Proceedings of Educational Institutions of Communication. 2023;(9):72–80. (In Russ.)*

15. Tomakova R.A., Filist S.A., Brezhnev A.N., et al. The method and algorithm of autonomous flight trajectory planning of an unmanned aerial vehicle when monitoring the fire situation in order to detect the source of ignition early. *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(1):93–110. (In Russ.)*

16. Kuleshova E.A., Tanygin M.O. Investigation of the characteristics of modern pseudorandom sequence generators. *Telekommunikatsii = Telecommunications. 2023;(7):28–39. (In Russ.)*

17. Filist S.A., Tomakova R.A., Nefedov N.G., et al. Intelligent image processing system obtained from unmanned aerial vehicles. *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. 2022;12(4):64–85. (In Russ.)*

18. Larin S.N., Ermakova I.M. Integrated assessment of innovative software projects quality: a system of indicators. *International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2022;(3-3):179–184.*

19. Andronov V.G., Chuev A.A., Knyazev A.A. Model of parameters of deviations of the flight route of unmanned aerial vehicles from a given trajectory. *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;25(4):145–161. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-145-161>*

20. Mukhin I.E., Tyapkin S.A., Koptev D.S., Shuklina Yu.V. The use of vibration signal structure indicators to solve the problems of diagnosing the technical condition of critical units of modern aircraft. *Telekommunikatsii = Telecommunications*. 2023;(6):2–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.31044/1684-2588-2023-0-6-2-14>. EDN ZCPQKS

Информация об авторах / Information about the Authors

Хмелевская Алена Валентиновна, старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: aquarel85@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0656-1223

Alena V. Khmelevskaya, Senior Lecturer of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: aquarel85@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0656-1223

Бабанин Иван Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: babanin_ivan@bk.ru, ORCID: 0000-0001-6114-871X

Ivan G. Babanin, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: babanin_ivan@bk.ru, ORCID: 0000-0001-6114-871X

Севрюков Александр Евгеньевич, доцент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alseveryukov@yandex.ru, ORCID: 0009-0002-7234-5983

Alexander E. Sevryukov, Associate Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: alseveryukov@yandex.ru, ORCID: 0009-0002-7234-5983

Николаенко Антон Игоревич, аспирант кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nikolaenkoai@yandex.ru, ORCID: 0009-0001-7423-0103

Anton I. Nikolaenko, Post-Graduate Student of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nikolaenkoai@yandex.ru, ORCID: 0009-0001-7423-0103

Бабанина Екатерина Юрьевна, магистрант
кафедры космического приборостроения
и систем связи, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: babanina@internet.ru,
ORCID: 0009-0001-8014-6506

Ekaterina Yu. Babanina, Undergraduate
of the Department of Space Instrumentation
and Communication Systems, Southwest State
University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: babanina@internet.ru,
ORCID: 0009-0001-8014-6506

Севрюков Антон Александрович,
специалист по тестированию, ООО «Эдвансед
Трансформейшн Консалтинг»,
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: tony.sevryukov@internet.ru,
ORCID: 0009-0009-7027-8124

Anton A. Sevryukov, Testing Specialist,
Advanced Transformation Consulting LLC,
Moscow, Russian Federation,
e-mail: tony.sevryukov@internet.ru,
ORCID: 0009-0009-7027-8124

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-60-71>



UDC 617.57.77

The possibility of unifying neural interfaces to create an integrated control system for prostheses: a brief review

Ali M. Samandari¹ ✉, Andrey N. Afonin²

¹ Belgorod State National Research University
85 Pobedy Str., Belgorod 308015, Russian Federation

✉ e-mail: aliofphysics777ali@gmail.com

Резюме

The purpose of research. To date, neurointerfaces have not been unified to create combined prosthetic control systems. Based on this, this review is aimed at understanding the possibility of integrating neurointerfaces by clarifying the advantages and disadvantages of neurotechnologies related to prosthetics and the possible creation of a combined prosthesis control system.

Methods. Analysis of brain-computer interfaces available in the literature in combination with neuroimaging experiments, especially in a hybrid system. A number of databases of scientific literature were used for the analysis, namely Google Scholar, scopus, etc. Links to the database data on the Internet: <https://scholar.google.com/>, <https://www.mdpi.com/journal/sensors>, elibrary.ru, <https://www.refseek.com>, <https://link.springer.com/>, <https://www.base-search.net>

Results. Brain-computer interfaces are currently being used in a wide variety of fields, including to improve the lives of people with disabilities. However, individual neural interfaces have certain disadvantages that make it difficult to use them to control mechanical devices, including prosthetic limbs. Hybrid neural interface systems (as an integrated software and hardware complex) are significantly superior to those obtained using separate neural interfaces, and these systems can be used for medical purposes.

Conclusion. This review provides a brief overview of the disability of people with missing upper limbs and how to improve their lives with prosthetics. The analysis of various hybrid methods of brain research is given. It can be noted that fNIRS technology is the closest technology that can facilitate the integration of neural interfaces, since it has advantages that make it a tool that complements other technologies, its advantages make up for the inherent disadvantages of fNIRS. It has been established that the hybrid system provides a clear advantage over individual neural interfaces.

Keywords. disability; brain-computer-interface; electroencephalography; surface electromyography; integrated control system; prostheses.

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

For citation: Samandari A.M., Afonin A.N. The possibility of unifying neural interfaces to create an integrated control system for prostheses: a brief review. *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;14(2):60–71. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-60-71>

Received 20.04.2024

Accepted 15.05.2024

Published 28.06.2024

© Samandari A. M., Afonin A. N., 2024

Возможность интеграции нейроинтерфейсов для создания комбинированной системы управления протезами: краткий обзор

А. М. Самандари¹, А. Н. Афонин² ✉

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, д. 85, г. Белгород 308015, Российская Федерация

✉ e-mail: aliofphysics777ali@gmail.com

Abstract

Цель исследования. На сегодняшний день нейроинтерфейсы не унифицированы для создания комбинированных систем управления протезами. Исходя из этого данный обзор направлен на представление возможности интеграции нейроинтерфейсов путем выяснения преимуществ и недостатков нейротехнологий, связанных с протезированием, и возможного создания комбинированной системы управления протезами.

Методы. Осуществлен анализ имеющихся в литературе исследований интерфейсов «мозг-компьютер» в сочетании с экспериментами по нейровизуализации, особенно в гибридной системе. Для анализа использован ряд баз научной литературы, а именно Google Scholar, Scopus и др. Ссылки на данные базы в сети Интернет: <https://scholar.google.com/>, <https://www.mdpi.com/journal/sensors>, elibrary.ru, <https://www.refseek.com>, <https://link.springer.com/>, <https://www.base-search.net>.

Результаты. Интерфейсы «мозг – компьютер» в настоящее время используются в самых разных областях, в том числе для улучшения жизни людей с ограниченными возможностями. Однако отдельные нейроинтерфейсы имеют определенные недостатки, затрудняющие их применение для управления механическими устройствами, в том числе протезами конечностей. Системы гибридных нейроинтерфейсов (как интегрированный программно-аппаратный комплекс) значительно превосходят те, которые были получены при использовании отдельных нейроинтерфейсов, и они могут быть применены в медицинских целях.

Заключение. В этом обзоре представлен краткий обзор инвалидности людей с отсутствием верхних конечностей и того, как улучшить их жизнь с помощью протезов. Дан анализ различных гибридных методов исследования головного мозга. Можно отметить, что fNIRS является технологией, которая может способствовать интеграции нейроинтерфейсов, поскольку имеет преимущества, которые делают её инструментом, дополняющим другие технологии. Установлено, что гибридная система обеспечивает явное преимущество по сравнению с отдельными нейроинтерфейсами.

Ключевые слова: инвалидность; интерфейс «мозг – компьютер»; электроэнцефалография; поверхностная электромиография; интегрированная система управления; протезы.

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

Для цитирования: Самандари А. М., Афонин А. Н. Возможность интеграции нейроинтерфейсов для создания комбинированной системы управления протезами: краткий обзор // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 2. С. 60–71. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-60-71>

Поступила в редакцию 20.04.2024

Подписана в печать 15.05.2024

Опубликована 28.06.2024

Introduction

At present time, natural organs are not replaced by artificial organs with the same accuracy, and the loss of a limb in itself is a great loss. Continued accidents, diseases, and other problems leave behind a lot of physical problems in people, with less than one percent of all people with disabilities under the age of five [1]. Physically disabled amputees lose their freedom of movement and may develop mental illnesses, leading to isolation from social contact. The concept of disability cannot be reduced to just a physical loss, but it is a heavy and

boring feeling that affects a person throughout his life and constantly grows in physically disabled people, who may be mentally disabled, and this feeling may lead them to suicide.

Loss of the lower and upper limbs is one of the most common disabilities because it is the most prominent and most used external organ in people. More than 3 million people worldwide suffer from the disability of arm amputation [2]. The Disability of the upper extremities can be divided into five main parts, as shown in Figure 1 [3].

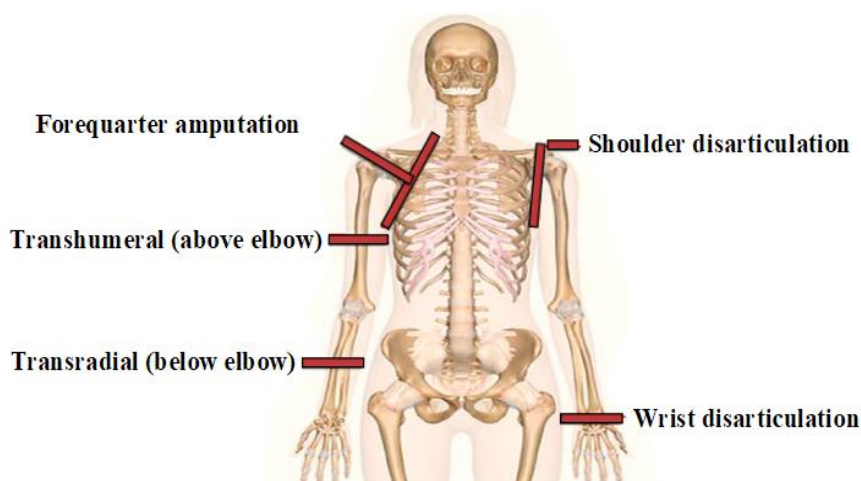


Fig. 1. Upper limb amputation regions with five parts

Deepen the understanding of disability, a multifaceted, multidimensional, complex and interdisciplinary social phenomenon, in all cultures and historical periods, promote greater awareness of the experiences of people with disabilities, advocate for social change that promotes positive emotions without negativity and encourage them to socialize without isolation [4]. The accelerated scientific progress, especially in the technological field, has entered the lives of people with disabilities to find appropriate

solutions and ways to improve their lives. The solutions lie in finding artificial substitutes to replace the amputated natural limbs, but they do not come - that is, artificial limbs - with the same precision, feeling, sensation and freedom of movement that their counterpart from natural limbs possesses. The beginning of the idea of prosthetics may date back historically to a large artificial toe made of wood found on the foot of the mummy of an Egyptian woman 3000 years ago and it was the oldest

prosthesis in the world and was used then for decoration [5]. If the prosthesis exceeds beyond the idea of aesthetics and contributes to improving the life of a disabled person by performing a motor task, even by 1%, it is definitely better than using it for decorative purposes only.

A prosthesis is a device that replaces a natural limb to beautifully complete the physical structure and perform the tasks and functions performed by the latter. Modern bionic prostheses have actuators that perform the tasks of movements and in order to control these movements, neural interfaces are used- a hardware- software complex for functional interconnection between a biological object (animal or human) and a machine for the direct exchange of information between the human nervous system and the electronic device- to control the drives of such bionic prostheses [6].

The first neural interfaces mentioned in the scientific literature developed by a research group in 1973–1977 [6; 7]. Despite the large number of modern scientific studies and numerous articles, a unified classification of neural interfaces has not yet been developed. The functionality of neural interfaces is based on the real-time detection of patterns of brain activity using neuroimaging methods, such as electroencephalography (EEG), functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) and others methods, and on the transformation of the obtained information into control commands for hardware such as bioprosthesis, exoskeleton, neuro-interface for attention control, etc. It is known that neuroimaging techniques have

advantages and have some inherent disadvantages, and it is reasonable that not all of these techniques share the same disadvantage. In other words, defects that exist in one technique may not be present in the other.

fNIRS in its biggest disadvantages with a depth of no more than 3 cm inside the skull and with time delay of 3-5 seconds in detecting areas of brain activity make it an incomplete method, but it has advantages that make it able to be a tool for receiving or contributing with advantages from and to other technologies to create a technical combination [8; 9].

EEG technology in both its states, invasive and non-invasive, based on direct electrical brain activity has proven its presence in several fields. By using electrodes located on the head surface (non-invasive) is still very low for the exchange of information between the brain and the machine. Despite, it is characterized by very high temporal and spatial accuracy, but in the terminology of using EEG as a control interface in prosthetics, its big drawback is that it is highly sensitive to artifacts and this is not at all suitable for using it individually as a control interface for prosthetics [10]. For several decades, surface electromyography (sEMG) signals- based on the recording of muscle activity- are investigated as an intuitive human-machine interfaced to control prosthetic arms [11; 12]. The absence of muscles, the presence of muscular dystrophy, or the remaining part of the muscle is unable to produce muscle activity, all this make sEMG when used individually

out of the calculations of the formation of an integrated control system.

Despite the numerous studies and scientific experiments of EEG and sEMG towards prosthetic applications, these two technologies are absolutely unsuitable for the formation of an integrated control system, even if a combination of these two technologies is formed. As for fNIRS, even if it is proved to be unsuitable for prosthetic applications, it will serve as a complementary tool for unifying neural interfaces to form a promising integrated prosthetic control system.

Materials and methods

The research methodology (as shown in Figure 2) was limited to the most common techniques that are the focus of modern studies within industrial limb applications and through which an integrated control system can be created. Despite the fact that fNIRS is used in various studies and has a wide application in various fields, the

research methodology considered relevant research, articles and studies towards prosthetic limb scenarios.. The ultimate purpose of this review is to examine the fit of the fNERS neuroimaging technique with other techniques toward the goal of the review. In addition, this review compared the results of studies involving these techniques in single use and hybrid use. Based on well-known databases, namely Scopus, Google Scholar, and various sites, such as <https://scholar.google.com/> and others. In addition, various links are indicated at <https://www.mdpi.com/journal/sensors>, <https://www.refseek.com>, and others.

Finally, hundreds of relevant articles were reviewed, many of those that did not go to the essence of the topic were discarded, and those that did not carry modern ideas were deleted, after which followed the recommendations of experienced people and considered their comments in order to strengthen the methodology and targeted analysis.

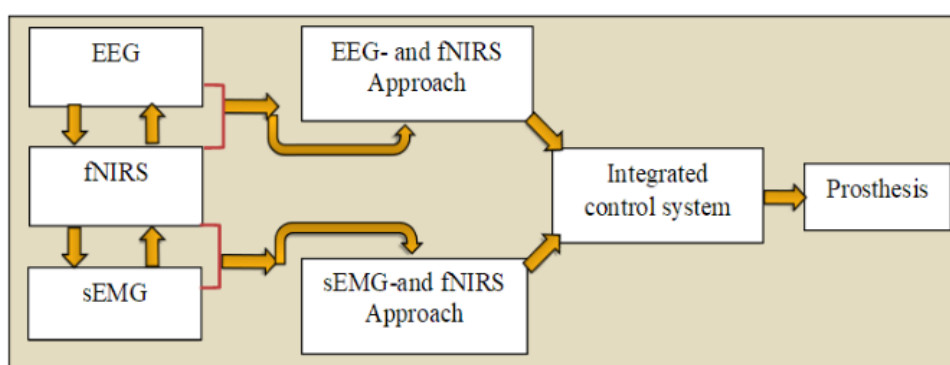


Fig. 2. Research methodology based on an integrated control system for prostheses

Brain-computer-interface (BCI)

BCI or simply a neural interface. is one of the most rapidly progressing topics in various applications of science and

technology, including physics, neuroscience, engineering etc. [13], which is closely related to physics and this would require the classification of neural activities in the

brain to different states [14]. Historically the first EEG-based BCI enable to generate a control signal for functional electrical stimulation was in 1999 [15]. In 2003 was the combination of BCI and functional electrical stimulation, and thanks to this combination, BCI was developed which can help paralyzed patients, to control their paralyzed limbs, therefore that the patient was able to take a cylindrical object, such as glass with water [16].

BCI is a very promising option for controlling neuroprostheses [14; 17]. Control command based classification, in its active state use changes in brain activity, which are directly and consciously controlled by the operator of the neural interface, regardless of external events, for control commands. The advantages and disadvantages of neuroimaging techniques appear together in one method and this in itself is a challenge. One of the main challenges of BCI systems is the control of prostheses by the electrical activity of the brain, whether using them individually or in a hybrid method [18]. By 59 % of the BCI system uses only one type of physiological signal, mostly from EEG.

There is a hybrid BCI which takes advantages of different techniques [19] and includes active (a complex external device e.g a prostheses- is controlled by a series of functional components of the control system) and passive (for monitoring the brain activity provide important information about operator's mental condition e.g, emotional state- when the command classification algorithm of the active BCI is

dynamically adjusted depending on the state of the operator diagnosed by the passive BCI. The most important thing that concerns all researchers in the field of prosthetics is to find artificial systems similar to natural limbs.

The development of active prostheses - with external strength and mobility provided by actuators, offering high performance and functionality, is at the expense of complexity [20]. A growing field and a high goal of scientific research, which is focused on the design of new and powerful control systems and methods of interaction between prostheses and human intention (physical and imaginary implementation) that means the need to unify the neural interfaces to form a promising system in prosthetics.

EEG and fNIRS approach

EEG in both its states is an invasive and non-invasive method used to record brain signals. In its invasive state using implanted electrodes inside the brain such as electrocorticography or intracranial (iEEG) has high spatial and temporal resolution, wide bandwidth, high amplitude and small sensitivity to artifacts [21], allows efficient decoding of small brain signals, in particular those related to motor skills [22]. In exchange for these advantages, its disadvantages do not allow its use, because the implantation of electrodes inside the brain may cause brain infection, as well as the cells adjacent to those electrodes may die, and the connective tissue dies, necessitating the replacement of those electrodes continuously. Experiments of EEG interfaces,

successfully conducted on monkeys [23; 24], but for humans, the EEG method of controlling bionic prostheses from both hygienic and ethical aspects is also not used.

The combination of EEG-fNIRS carries a clear signal and is a promising approach because of its low cost, portability flexibility, low interference, and good spatial and temporal resolution [9; 10]. In terms of signal recording, combining EEG and fNIRS provides additional information about the bioelectric activity of the brain. In addition, the combination of fNIRS and EEG has certain unique characteristics, as the rationale behind their combination is their dependence on a physiological phenomenon called neurovascular coupling [25] within the brain, which makes them more useful in certain applications. At present, there are numerous studies active in the study of the combination of these techniques, particularly for prosthetic control purposes. This greatly encourages the creation of a system that may be the most promising for controlling prosthetics [26; 27].

EEG based on non-invasive method has also high temporal and spatial resolution, however, the rate of information transfer between the brain and EEG in its non-invasive state is still very low, in addition, what is remarkable about EEG is its high sensitivity to artifacts. It is clear that the control of prostheses requires high accuracy in advance to transmit information from the brain to the control device and, as such, EEG is also unsuitable for prosthetic applications, if used individually. EEG has not been individually suitable for prosthetic

applications, but recent scientific studies have proven its existence as a very suitable hybrid system with the fNIRS technique. For example, the classification accuracy of the EEG, fNIRS based BCI system individually is $(85.64 \pm 7.4\%)$, $(85.55 \pm 10.72\%)$ respectively while the hybrid EEG-fNIRS based BCI had to achieve higher classification accuracy $(91.02 \pm 4.08\%)$ and efficiency by integrating their complementary characteristics [28].

sEMG and fNIRS approach

Electromyography (EMG) is another promising platform for controlling neural prostheses using muscle electrical activity [29] and for neurorehabilitation [30]. Surface electromyography measures the electrical signal generated by the skeletal muscles on the surface of the skin. The absence of muscle or the presence of muscular atrophy renders this technique completely inappropriate for creating a prosthetic system [31]. Recent studies have demonstrated positive correlations between EMG signals and fNIRS. These correlations may provide evidence that a combination of these two techniques can be used to further explore the mapping relationship between brain activity and motor task execution and could be directed toward clinical studies [32; 33]. Although it is commonly used in modern experimental studies. However, it is impossible to form a unified neural interface system to control prosthetics.

Results and their discussion

Despite the shortcomings inherent in fNIRS technique, scientific research has not

stopped its function as a tool for controlling prostheses, and studies are continuing to the present. In a study related to the topic of the article, in the photograph (Figure 3) is a doctor of computer science named Salah

from Iraq where he is conducting an experiment to research and develop a control system for prostheses using fNIRS, the results of the experiment will be announced in the near future.

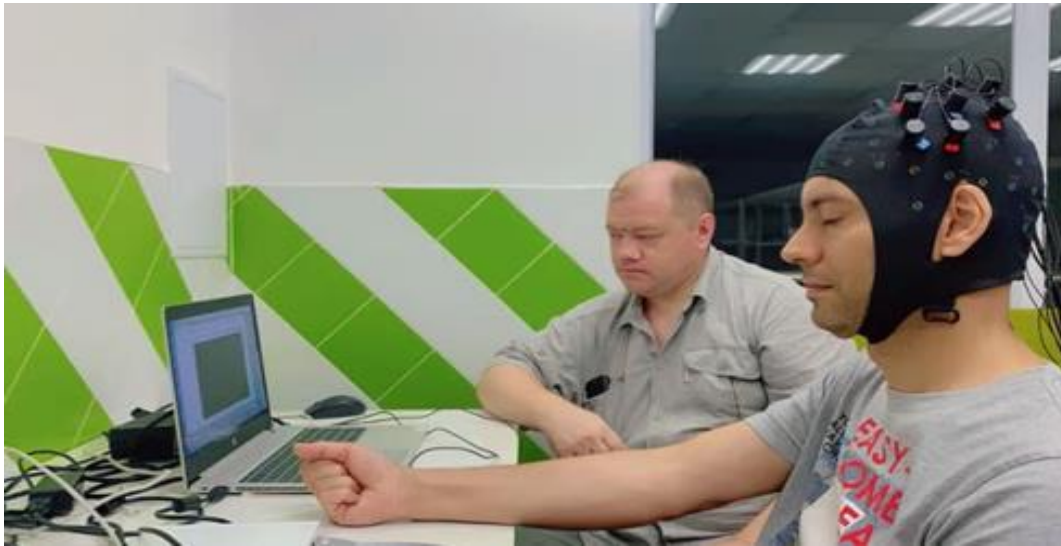


Fig. 3. Shows a photograph of one of the study participants performing experimental tasks in the field of prosthetics in a laboratory of the Belgorod State National Research University

There are recent studies that have even included the challenges facing this method, for example rethinking the delay hemodynamic responses [34]. Even if future studies prove that the fNIRS technology is not suitable for creating an integrated control system for prostheses, it is really suitable for unifying neural interfaces, forming a combination of an integrated system (hardware software), and this is documented by the results of recent experimental studies, for example fNIRS with EEG [35; 36] and fNIRS with EMG [32; 37]. And all this falls on the shoulders of future studies for the purpose of unifying neural interfaces or finding a control system either from the aforementioned techniques, or it may be from other techniques, although the techniques mentioned in the review are commonly used.

Conclusions

Neural interfaces have succeeded in controlling prostheses in their individual cases in some places while failing in others. There are successful examples, and multiple researches prove the great superiority of a combination of neural interfaces for interested studies in electronic prosthetics or rehabilitation applications, for example, the combinations of fNIRS with EEG and fNIRS with sEMG. In brief, summarize the following:

1) fNIRS is still in the circle of study and experimentation, therefore it is not true in the current time to say that it is not suitable for controlling prosthetic limbs.

2) fNIRS and EEG are non-invasive methods can form a hybrid system that may

be a candidate system to be the most promising technology for controlling prosthetic limbs.

3) fNIRS can form a hybrid system with sEMG which may also be a candidate system to be the most promising technology for controlling prosthetics.

4) There are no scientific studies indicating any superiority between 2 and 3.

5) 1, 2 and 3 will remain important for future studies and research for the purpose of unifying neural interfaces in order to create an integrated control system for prostheses.

References

1. Ronald J.B., Loren E.W. *Introducing Disability Studies*. 2nd ed. Lynne Rienner Publishers; 2021. 289 p.
2. Sachin K., Dhruv G., et al. A novel deep learning approach to predict subject arm movements from EEG-based signals. *Neural Computing and Applications*. 2023;(35):11669–11679.
3. Neelum Y.S., Zareena K., et al. fNIRS-Based Upper Limb Motion Intention Recognition Using an Artificial Neural Network for Transhumeral Amputee. *Sensors*. 2022;22(3):726. <https://doi.org/10.3390/s22030726>
4. Philip M. Ferguson *Disability Studies: What Is It and What Difference Does It Make? Research & Practice for Persons with Severe Disabilities*. 2012;37(2):70-80.
5. Nerlich A.G., Zink A., Szeimies U., Hagedorn H.G. Ancient Egyptian prosthesis of the big toe. *Lancet*. 2000;(356):2176–2179.
6. Vidal J.J. Toward direct brain-computer communication. *Annu Rev. Biophys. Bioeng.* 1973;2(1):157–180. <https://doi.org/10.1146/annurev.bb.02.060173.001105>
7. Ma T., et al. The hybrid BCI system for movement control by combining motor imagery and moving onset visual evoked potential. *J. Neural. Eng.* 2017;14(2):26015. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aa5d5f>
8. Hasan M.A.H., Khan U., Misra D. A Computationally Efficient Method for Hybrid EEG-fNIRS BCI Based on the Pearson Correlation. *BioMed Research International*. 2020;(3):1–13. <https://doi.org/10.1155/2020/1838140>,
9. Abdalmalak A., Lawrence S. Detecting Command- Driven Brain Activity in Patients with Detecting Command-Driven Brain Activity in Patients with Disorders of Consciousness Using TR-fNIRS Disorders of Consciousness Using TR-fNIRS. Available at: <https://ir.lib.uwo.ca/etdhttps://ir.lib.uwo.ca/etd/7055> 2020 (accessed 17.03.2024).
10. Hramov A.E., Maksimenko V.A., Pisarchik A.N. Physical principles of brain–computer interfaces and their applications for rehabilitation, robotics and control of human brain states. *Physics Reports*. 2021;(918):1–133. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2021.03.002>

11. Shahzad W., Ayaz Y., Khan M., Naseer J.N., Khan M. Enhanced performance for multi-forearm movement decoding using hybrid IMUSEMG interface. *Frontiers Neurorobot.* 2019;(13):43.
12. Phinyomark A., Khushaba R.N., Scheme E. Feature extraction and selection for myoelectric control based on wearable EMG sensors. *Sensor.* 2018;18(5):1615.
13. He B., Yuan H., Meng J., Gao S. Brain-computer interfaces. In: *Neural Engineering*. Singapore: Springer; 2020. P. 131–183.
14. Alejandro A., Carlos A., et al. *Biosignal Processing and Classification Using Computational Learning and Intelligence Principles, Algorithms, and Applications*. London: Academic Press; 2021. 536 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-008745-7>
15. Lauer R.T., Peckham P.H., Kilgore K.L. EEG-Based control of a hand grasp neuroprosthesis. *Neuroreport.* 1999;10(8):1767–1771.
16. Pfurtscheller G., Muller G.R., et al. Thought-control of functional electrical stimulation to restore hand grasp in a patient with tetraplegia. *Neuroscience Letters.* 2003. 351(1):33–36. [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(03\)00947-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(03)00947-9)
17. Gutierrez-Martinez J. Neuroprostheses: Significance in gait rehabilitation. In: *Advanced Technologies for the Rehabilitation of Gait and Balance Disorders*. Singapore: Springer; 2018. P. 427–446.
18. Bhattacharyya S., Mukul M.K. Reactive frequency band based movement imagery classification. *J. Ambient. Intell. Hum. Comput.* 2018;(9):1–14.
19. Nam C.S., Nijholt A., Lotte F. *Brain-computer interfaces handbook: technological and theoretical advances*. Oxford, UK: CRC Press; 2018. 814 p.
20. Windrich M., Grimmer M., Christ O., Rinderknecht S., Beckerle P. Active lower limb prosthetics: A systematic review of design issues and solutions. *BioMed. Eng. OnLine.* 2016;15(283):140. <https://doi.org/10.1186/s12938-016-0284-9>
21. Schwartz A.B., Cui X.T., Weber D.J., Moran D.W. Brain-controlled interfaces: Movement restoration with neural prosthetics. *Neuron.* 2006;(52):205–220. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.09.019>
22. Lal N., Hinterberger T., et al. Methods towards invasive human brain computer interfaces. In: *Advances in Neural Information Processing Systems*. Cambridge: MIT Press; 2005. P. 737–744.
23. Velliste M., Perel S., Spalding M.C., et al. Cortical control of a prosthetic arm for self-feeding. *Nature.* 2008;453(7198):1098–1101.
24. Hochberg L.R., Donoghue J.P. Sensors for braincomputer interfaces. *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.* 2006;25(5):32–38.

25. Jianeng L., Jiewei L., et al. An EEG-fNIRS neurovascular coupling analysis method to investigate cognitive-motor interference. *Computers in Biology and Medicine*. 2023;(160):106968.
26. Li R., et al. Concurrent fNIRS and EEG for Brain Function Investigation: A Systematic, Methodology-Focused Review. *Sensors*. 2022;22(15):5865. <https://doi.org/10.3390/s22155865>
27. Ergün E., Aydemir Ö., Korkmaz O.E. A Novel Scrolling Text Reading Paradigm for Improving the Performance of Multiclass and Hybrid Brain Computer Interface Systems. Available at: <https://ssrn.com/abstract=4740312> (accessed 12.03.2024).
28. Rihui L., et al. Enhancing Performance of a Hybrid EEG-fNIRS System Using Channel Selection and Early Temporal Features. *Front. Hum. Neurosci.* 2017;(11):1–11. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00462>
29. Tao S., Zhe Y. et al. Review of sEMG for Robot Control: Techniques and Applicationsby. *Applied Sciences*. 2023;13(17):9546.
30. Khorasani A. Hulsizer J. Myoelectric interface for neurorehabilitation conditioning to reduce abnormal leg co activation after stroke: a pilot study. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2024;(1):115. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3398815/v1>
31. Martinek R., et al. Advanced bioelectrical signal processing methods: Past, present, and future approach – part III: Other biosignals. *Sensors*. 2021;21(18):6064. <https://doi.org/10.3390/s21186064>
32. Daniel N., Sybilski K., Kaczmarek W., Siemiaszko D., Małachowski J. Relationship between EMG and fNIRS during Dynamic Movements. *Sensors*. 2023;23(11):1–14.
33. Giminiiani R.D., et al. Validation of fabric-based thigh-wearable EMG sensors and oximetry for monitoring quadricep activity during strength and endurance exercises. *Sensors*. 2020; 20(17):1–13. <https://doi.org/10.3390/s20174664>
34. Wang Z., Fang J., Zhang J. Rethinking Delayed Hemodynamic Responses for fNIRS Classification. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2023;(31):99.
35. Neelum Y.S., Zareena K., Syed A.U., Noman N., Umer F., Ahmed A., Syed Z.H., Umar S.K., Haroon K., Peyman M. Enhancing Classification Accuracy of Transhumeral Prosthesis: Hybrid sEMG and fNIRS Approach. *Digital Object Identifier*. 2021;(9):1.
36. Ali M. U., et al. An Optimization-Based Hybrid EEG and fNIRS – Brain Computer Interface. *Bioengineering*. 2023;10:608. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10050608>
37. Wang Z., et al. Incorporating EEG and fNIRS Patterns to Evaluate Cortical Excitability and MI-BCI Performance During Motor Training. *IEEE Trans. Neural. Syst. and Rehabil. Eng.* 2023;(31):2872–2882. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2023.3281855>

Информация об авторах / Information about the Authors

Samandari Ali Mirdan, Post-Graduate Student,
Belgorod State National Research University,
Belgorod, Russian Federation,
e-mail: aliofphysics777ali@gmail.com

Али М. Самандари, аспирант,
Белгородский государственный национальный
исследовательский университет,
г. Белгород, Российская Федерация,
e-mail: aliofphysics777ali@gmail.com

Afonin Andrey Nikolaevich, Doctor of Sciences
(Engineering), Professor of the Department
of Information and Robotic Systems, Belgorod
State National Research University,
Belgorod, Russian Federation,
e-mail: afonin@bsu.edu.ru

Андрей Н. Афонин, доктор
технических наук, профессор кафедры
информационных и робототехнических систем,
Белгородский государственный национальный
исследовательский университет, г. Белгород,
Российская Федерация,
e-mail: afonin@bsu.edu.ru

Разработка метода распознавания эмоций по речевому сигналу

Д. А. Кравчук¹ ✉

¹ Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета
ул. Шевченко, д. 2/Е, г. Таганрог 347922, Российская Федерация

✉ e-mail: kravchukda@sfedu.ru

Резюме

Цель исследования – автоматическое распознавание эмоций говорящего, основанное на обработке звуко-записей, предназначенных для использования в системах сигнализации при работе с операторами локомотивных бригад и диспетчерских служб.

Методы. Распознавание эмоций человека в последние годы является быстроразвивающейся областью исследований. Особенности речевого тракта, например мощность звука, формантные частоты, применяются для обнаружения некоторых эмоций с хорошей точностью. Использован метод определения энергии сигнала с выделением доминирующей частоты. В работе разработан программный код, на основе которого приведен анализ четырех эмоций: гнев, радость, страх и спокойствие. Самый важный и сложный шаг – это определение признаков наиболее подходящих для различения эмоций и наличие баз данных. Сбор баз данных является сложной задачей, требующей проявления искренности эмоций. Зачастую сбор базы данных происходит в искусственной среде, и речь может звучать постановочно, для исключения таких проблем необходимо использовать записи колл-центров.

Результаты. Получены и обработаны записи базовых эмоциональных состояний, такие как гнев, радость, грусть, страх и удивление, которые являются наиболее частым случаем исследования. Разработанный программный код позволяет приблизиться в автоматическому определению эмоций по речевому сигналу. Для анализа речевых записей в выборках использовались показатели энергии сигнала и выделения доминирующей частоты.

Заключение. Реализуемый метод контроля эмоционального состояния человека оператора по речевому сигналу находит широкое применение в профилактике и улучшении показателей психофизиологической профпригодности работников локомотивных бригад, сохранения их профессионального здоровья. Отчетливые различия наблюдаются в характеристиках всех видов эмоций.

Ключевые слова: эмоции; речевой сигнал; спектр сигнала; метод распознавания.

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

Для цитирования: Кравчук Д. А. Разработка метода распознавания эмоций по речевому сигналу // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 2. С. 72–80. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-14-2-72-80>

Поступила в редакцию 18.04.2024

Подписана в печать 11.05.2024

Опубликована 28.06.2024

Development of a method for recognizing emotions from a speech signal

Denis A. Kravchuk

¹ Institute of Nanotechnology, Electronics and Instrumentation of the Southern Federal University
2/E Shevchenko Str., Taganrog 347922, Russian Federation

✉ e-mail: kravchukda@sfned.ru

Abstract

The purpose of research is automatic recognition of the speaker's emotions, based on the processing of sound recordings intended for use in alarm systems when working with operators of locomotive crews and dispatch services.

Methods. Human emotion recognition has been a rapidly developing area of research in recent years. Features of the vocal tract, such as sound power, formant frequencies, are used to detect certain emotions with good accuracy. A method was used to determine the signal energy by highlighting the dominant frequency. The work has developed a program code, on the basis of which an analysis of four emotions is given - anger, joy, fear and calm. The most important and difficult step is to determine the features most suitable for distinguishing emotions and the availability of databases. Collecting databases is a complex task requiring the manifestation of sincerity of emotions. Often, the collection of a database takes place in an artificial environment and the speech may sound staged; to eliminate such problems, it is necessary to use call center recordings.

Results. Recordings of basic emotional states, such as anger, joy, sadness, fear and surprise, which are the most common case of the study, were obtained and processed. The developed software code allows us to get closer to automatically determining emotions from a speech signal. To analyze speech recordings in samples, indicators of signal energy and identification of the dominant frequency were used.

Conclusion. The implemented method of monitoring the emotional state of a human operator using a speech signal is widely used in the prevention and improvement of indicators of the psychophysiological professional suitability of locomotive crew workers and the preservation of their professional health. Distinct differences are observed in the characteristics of all types of emotions.

Keywords: emotions; speech signal; signal spectrum; recognition method.

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

For citation: Kravchuk D. A. Development of a method for recognizing emotions from a speech signal. *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(2):72–80. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-72-80>

Received 18.04.2024

Accepted 11.05.2024

Published 28.06.2024

Введение

В последние годы были проведены различные исследования, чтобы выявить особенности, которые будут полезны при распознавании эмоций. Ряд исходных особенностей, особенностей речевого тракта, например мощность звука, формантные частоты, кепстральные коэффициенты, используются для обнаружения некоторых эмоций с хорошей точностью. Также анализируются параметры качества голоса, такие как коэффициент гармонического шума (HNR), мерцание.

Анализ речевого сигнала необходим для определения эмоций, использования в качестве биометрии [1], даже для изучения частоты сердечных сокращений говорящего [2], обнаружения усталости.

Основные эмоции подразделяются на печаль, страх, счастье, отвращение, удивление и гнев [3]. В литературе по анализу эмоций предлагаются две предпочтительные характеристики, известные как статистические и временные характеристики [4; 5].

Система распознавания речевых эмоций может быть структурирована путем анализа функций, которые эффективно выявляют каждую эмоцию в речевых сигналах [6].

Набор методов классификации речевых эмоций основан на скрытой модели Маркова [7], модели гауссовой смеси (GMM) [8], самоорганизующейся карте [9] и нейронной сети [10]. Классификатор разложения сингулярных значений (SVD) используется в [8], тогда как в [7] для классификации эмоций предлагается модель ансамблевой программной регрессии, также предлагается глубокая сеть убеждений, основанная на функциях высокого и низкого уровня [6]. Существует метод, основанный на машине опорных векторов и нейронных сетях, для классификации

пяти эмоций, таких как гнев, удивление, нейтральность, счастье и печаль [11]. Предложен в [12] метод, использующий несколько подклассификаторов для установления семи типов эмоций.

Материалы и методы

Каждый человек обладает уникальным голосом. Однако можно безошибочно отличить мужской голос от женского и наоборот, даже не видя собеседника, это происходит из-за различного биологического строения голосового аппарата у женщин и мужчин. Несмотря на это, голоса мальчиков и девочек в детстве похожи между собой.

Однако из-за большого диапазона размеров связок встречаются как мужчины с очень высоким голосом, так и женщины с крайне низким. Другим важным биологическим отличием, оказывающим влияние на голос, является длина речевого тракта, которая у мужчин больше, что еще сильнее снижает тон голоса, помимо размера голосовых связок.

На основе этих различий были записаны два голоса – мужской и женский. Была выбрана фраза Мартышки из мультфильма «38 попугаев»: «Все время думать одну и ту же мысль нельзя! Это очень вредно! От этого можно соскучиться и заболеть».

В работе [12] авторы выделяют четыре наиболее часто используемых эмоциональных состояний: нормальное, гнев, горе и страх. В речевом сигнале содержатся признаки, которые не только характеризуют индивидуальные особенности говорящего, но и его психофизическое состояние [13]. Отечественными авторами неоднократно проводились работы, посвященные связи эмоционального состояния человека и его речи [14].

Для распознавания эмоций по голосовому сигналу нужно количественно охарактеризовать сигнал [15] и выделить

важные параметры, которые отвечают за эмоциональное состояние [16]. К признакам, несущим информацию о психофизическом состоянии человека, относят [17]:

- громкость (интенсивность) речи;
- изменение частоты основного тона;
- изменение темпа речи;
- смещение энергетического спектра речи;
- спектральные характеристики (интенсивность, высота);
- временные характеристики (длительность слов и фраз, паузы между ними и др.).

Результаты и их обсуждение

Используя микрофон и программу «Запись голоса» из стандартных программ Windows, был записан текст с различными эмоциональными состояниями. В записи участвовали пятеро мужчин и женщин, каждый испытуемый записывал по десять фраз для последующей обработки. После этого записи были конвертированы в формат wav.

После был написан код для обработки аудиосигнала в Matlab, для чего

сначала был присвоен переменной путь к записанному аудиофайлу, а после, используя функции `audioread` и `timetable`, произведена обработка сигнала, начальный этап представлен ниже (рис. 1).

```
clc;
clear all;
Filename = '\\tsclient\C\filename.wav';
[data,fs] = audioread(Filename);
Sound = timetable(seconds((0:length(data)-1)/fs),data);
```

Рис. 1. Начальный этап обработки записи речи испытуемого

Fig. 1. Initial stage of record processing the subject's speech

С помощью встроенного модуля обработки сигнала MATLAB 2017b (signal analyzer) представлен спектр аудиосигнала. Полученные графики четырех различных эмоциональных состояний представлены в спокойном состоянии (рис. 2), в грустном состоянии (рис. 3), в гневе (рис. 4) и в состоянии страха (рис. 5). При этом верхние графики представляют собой запись речевого сигнала, на нижних графиках представлены результаты обработки в виде спектральной плотности мощности.

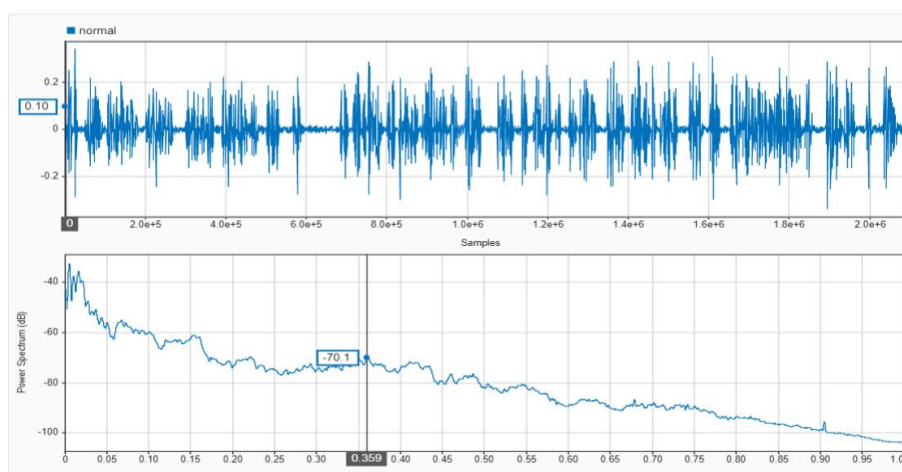


Рис. 2. Результат обработки сигнала фрагмента речи «Спокойное состояние говорящего»: сверху – запись сигнала; внизу – спектральная плотность мощности сигнала

Fig. 2. The result of signal processing in a quiet state: at the top – signal recording; at the bottom – signal power spectral density

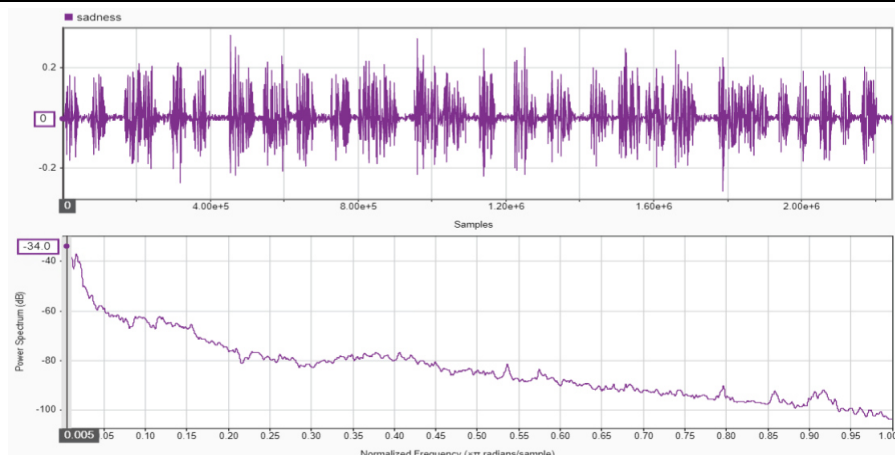


Рис. 3. Результат обработки сигнала в грустном состоянии: сверху – запись сигнала; внизу спектральная плотность мощности сигнала

Fig. 3. The result of signal processing in a sad state: at the top – signal recording; at the bottom – signal power spectral density

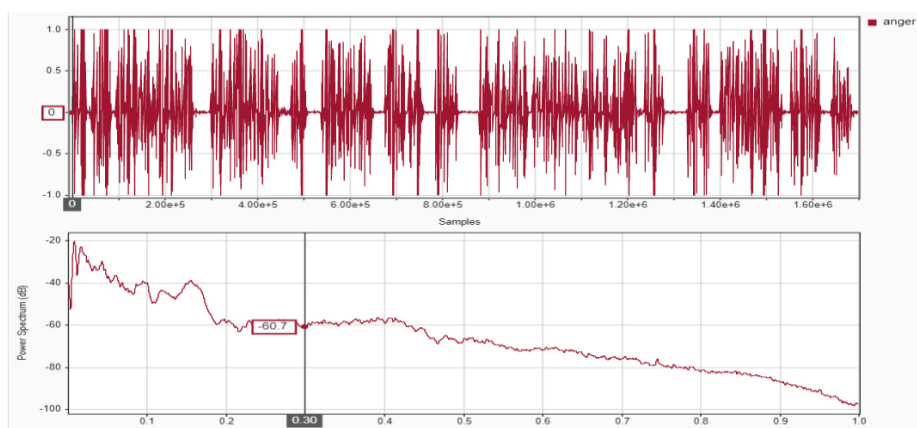


Рис. 4. Результат обработки сигнала в гневе: сверху – запись сигнала; внизу – спектральная плотность мощности сигнала

Fig. 4. Result of signal processing in anger: at the top – signal recording; at the bottom – signal power spectral density)

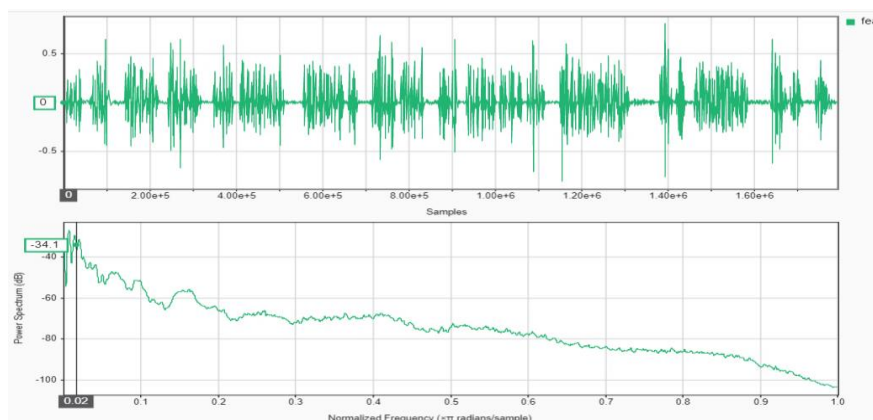


Рис. 5. Результат обработки сигнала в состоянии страха: сверху – запись сигнала; внизу – спектральная плотность мощности сигнала;

Fig. 5. The result of signal processing in a state of fear: at the top – signal recording; at the bottom – signal power spectral density)

Выводы

Исходя из полученных данных можно сделать вывод о том, что в речевом сигнале отражаются изменения, происходящие в эмоциональном спектре:

1. *Горе* или *печаль*. Заметное снижение темпа речи на 15–45% и частоты основного тона на 5–15%. В результате обработки 10 записей сигнала от каждого испытуемого установлено уменьшение интенсивности сигнала и мощности спектра в высоких частотах.

2. *Гнев*. Происходит увеличение темпа речи, повышение частоты основного тона на 140–210%, наблюдается повышение мощности высоких частот в спектре на 8–12 дБ.

3. *Страх*. Характеризуется увеличением темпа речи, низкой интенсивностью

сигнала, повышенной частотой основного тона и незначительной мощностью спектра в высоких частотах. Также речевой сигнал может быть дополнен тремором в голосе и заиканиями.

4. *Радость* – это состояние характеризуется увеличением темпа речи на 15–25% за счет сокращения пауз между отдельными словами и заметным повышением частоты основного тона. Интенсивность речевого сигнала возрастает на 3,5–6 дБ.

Проведенные исследования являются продолжением работ в области определения психоэмоционального состояния человека. Работа проводится в рамках создания системы контроля психоэмоционального состояния локомотивных бригад.

Список литературы

1. Adjectives grouping in a dimensionality affective clustering model for fuzzy perceptual evaluation / W. Huang, Q. Wu, N. Dey, A. Ashour, S. J. Fong, R. González-Crespo // Int. J. Interact. Multimedia. Artif. Intell. 2020. Vol. 6, N 2. P. 10. <https://doi.org/10.9781/ijimai.2020.05.002>
2. Xusheng Wang, Xing Chen, Congjun Cao. Human emotion recognition by optimally fusing facial expression and speech feature, Signal Processing // Image Communication. 2020. Vol. 84, N 10. P. 115831. <https://doi.org/10.1016/j.image.2020.115831>
3. Akçay M. B. OğuzK. Speech emotion recognition: emotional models, databases, features, preprocessing methods, supporting modalities, and classifiers // Speech. Commun. 2020. N 116. P. 56–76. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2019.12.001>
4. Speech Emotion Recognition with Dual-Sequence LSTM Architecture / J. Wang, M. Xue, R. Culhane, E. Diao, J. Ding, V. Tarokh // 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Barcelona, Spain, 2020. P. 6474–6478. <https://doi.org/10.1109/ICASSP40776.2020.9054629>
5. Recognize basic emotional states in speech by machine learning techniques using mel-frequency cepstral coefficient features / N. Yang, N. Dey, R. S. Sherratt, F. Shi // J. Intell. Fuzzy. Syst. 2020. N 39 (2). P. 1925–1936. <https://doi.org/10.3233/jifs-179963>

6. Daneshfar F., Kabudian S. J., Neekabadi A. Speech emotion recognition using hybrid spectral-prosodic features of speech signal/ glottal waveform, metaheuristic-based dimensionality reduction, and Gaussian elliptical basis function network classifier // *Appl. Acoust.* 2020. N 166. P. 107360. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107360>
7. Palo H. K., Behera D., Rout B. C. Comparison of classifiers for speech emotion recognition (SER) with discriminative spectral features // *Advances in Intelligent Computing and Communication. Proceedings of ICAC.* Singapore: Springer, 2020. P. 78–85. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2774-6_10
8. Speech emotion classification using attention-based lstm / Y. Xie, R. Liang, Z. Liang, C Huang., C. Zou, B. Schuller // *IEEE/ACM Trans. Audio Speech. Lang. Proc.* 2019. Vol. 27, N 11. P. 1675–1685. <https://doi.org/10.1109/TASLP.2019.2925934>
9. Hassouneh A., Mutawa A. M., Murugappan M. Development of a real-time emotion recognition system using facial expressions and EEG based on machine learning and deep neural network methods // *InformMed. Unlock.* 2020. N 20. P. 100372. <https://doi.org/10.1016/j.imu.2020.100372>
10. Automatic speech emotion recognition using an optimal combination of features based on EMD-TKEO / L. Kerkeni, Y. Serrestou, K. Raoof, M. Mbarki, M. A. Mahjoub, C. Cleder // *Speech. Commun.* 2019. N 114. P. 22–35. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2019.09.002>
11. Uddin Md. Zia, Nilsson E. G., Emotion recognition using speech and neural structured learning to facilitate edge intelligence // *Engineering Applications of Artificial Intelligence.* 2020. Vol. 94. P. 103775. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103775>
12. Excitation Features of Speech for Emotion Recognition Using Neutral Speech as Reference / S. R. Kadiri, P. Gangamohan, S. V. Gangashetty [et al.] // *Circuits. Syst. Signal. Process.* 2020. N 39. P. 4459–4481. <https://doi.org/10.1007/s00034-020-01377-y>
13. Gorshkov Y. G. Visualization of Lung Sounds Based on Multilevel Wavelet Analysis // *Scientific Visualization.* 2022. Vol. 14, N 2. P. 18–26. <https://doi.org/10.26583/sv.14.2.02>
14. Кравчук Д. А. Ультразвуковая система контроля психофизиологического состояния машиниста поезда // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение.* 2020. Т. 10, № 1. С. 134–142.
15. Распознавание эмоций по характеристикам речевого сигнала (лингвистический, клинический, информационный аспекты) / Л. П. Прокофьева, И. Л. Пластун, Н. В. Филиппова, Л. Ю. Матвеева, Н. С. Пластун // *Сибирский филологический журнал.* 2021. № 2. С. 325–336.
16. Горшков Ю. Г. Визуализация эмоциональной напряженности человека по речевому сигналу // *Научная визуализация.* 2023. Т. 15, № 2. С. 102–112.

17. Acoustocardiography with Assessment of Emotional Tension from the Voice / Y. G. Gorshkov, A. K. Volkov, N. A. Voinova [et al.] // Biomed. Eng. 2020. N 53. P. 383–387. <https://doi.org/10.1007/s10527-020-09948-8>

References

1. Huang W., Wu Q., Dey N., Ashour A., Fong S.J., González-Crespo R. Adjectives grouping in a dimensionality affective clustering model for fuzzy perceptual evaluation. *Int. J. Interact. Multimedia. Artif. Intell.* 2020;6(2):10. <https://doi.org/10.9781/ijimai.2020.05.002>
2. Xusheng Wang, Xing Chen, Congjun Cao. Human emotion recognition by optimally fusing facial expression and speech feature, *Signal Processing. Image Communication.* 2020;84(10):115831. <https://doi.org/10.1016/j.image.2020.115831>
3. Akçay M. B., Oğuz K. Speech emotion recognition: emotional models, databases, features, preprocessing methods, supporting modalities, and classifiers. *Speech. Commun.* 2020;(116):56–76. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2019.12.001>
4. Wang J., Xue M., Culhane R., Diao E., Ding J., Tarokh V. Speech Emotion Recognition with Dual-Sequence LSTM Architecture. *2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Barcelona, Spain; 2020. P. 6474–6478. <https://doi.org/10.1109/ICASSP40776.2020.9054629>
5. Yang N., Dey N., Sherratt R. S., Shi F. Recognize basic emotional states in speech by machine learning techniques using mel-frequency cepstral coefficient features. *J. Intell. Fuzzy. Syst.* 2020;(39):1925–1936. <https://doi.org/10.3233/jifs-179963>
6. Daneshfar F., Kabudian S.J., Neekabadi A. Speech emotion recognition using hybrid spectral-prosodic features of speech signal/glottal waveform, metaheuristic-based dimensionality reduction, and Gaussian elliptical basis function network classifier. *Appl. Acoust.* 2020;(166):107360. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107360>
7. Palo H.K., Behera D., Rout B.C. Comparison of classifiers for speech emotion recognition (SER) with discriminative spectral features. *Advances in Intelligent Computing and Communication: Proceedings of ICAC*. Singapore: Springer; 2020. P. 78–85. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2774-6_10
8. Xie Y., Liang R., Liang Z., Huang C., Zou C., Schuller B. Speech emotion classification using attention-based lstm. *IEEE/ACM Trans. Audio. Speech. Lang. Proc.* 2019;27(11):1675–1685. <https://doi.org/10.1109/TASLP.2019.2925934>
9. Hassouneh A., Mutawa A.M., Murugappan M. Development of a real-time emotion recognition system using facial expressions and EEG based on machine learning and deep neural network methods. *InformMed. Unlock.* 2020;(20):100372. <https://doi.org/10.1016/j.imu.2020.100372>

10. Kerkeni L., Serrestou Y., Raoof K., Mbarki M., Mahjoub M.A., Cleder C. Automatic speech emotion recognition using an optimal combination of features based on EMD-TKEO. *Speech. Commun.* 2019;(114):22–35. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2019.09.002>
11. Uddin Md. Zia, Nilsson E.G., Emotion recognition using speech and neural structured learning to facilitate edge intelligence. *Engineering Applications of Artificial Intelligence.* 2020;94:103775. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103775>
12. Kadiri S.R., Gangamohan P., Gangashetty S.V., et al. Excitation Features of Speech for Emotion Recognition Using Neutral Speech as Reference. *Circuits. Syst. Signal. Process.* 2020;39:4459–4481. <https://doi.org/10.1007/s00034-020-01377-y>
13. Gorshkov Y.G. Visualization of Lung Sounds Based on Multilevel Wavelet Analysis. *Scientific Visualization.* 2022;14(2):18–26. <https://doi.org/10.26583/sv.14.2.02>
14. Kravchuk D.A. Ultrasonic system for monitoring the psychophysiological state of a train driver. *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.* 2020;10(1):134–142. (In Russ.)
15. Prokofieva L.P., Plastun I.L., Filippova N.V., Matveeva L.Yu., Plastun N.S. Recognition of emotions based on the characteristics of the speech signal (linguistic, clinical, information aspects). *Sibirskii filologicheskii zhurnal = Siberian Journal of Philology.* 2021;(2):325–336. (In Russ.)
16. Gorshkov Yu.G. Visualization of human emotional tension using a speech signal. *Nauchnaya vizualizatsiya = Scientific Visualization.* 2023;15(2):102–112 (In Russ.)
17. Gorshkov Y.G., Volkov A.K., Voinova N.A., et al. Acoustocardiography with Assessment of Emotional Tension from the Voice. *Biomed. Eng.* 2020;(53):383–387. <https://doi.org/10.1007/s10527-020-09948-8>

Информация об авторе / Information about the Author

Кравчук Денис Александрович доктор технических наук, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета, г. Таганрог, Российская Федерация,
e-mail: kravchukda@sfedu.ru,
ORCID: 0000-0002-4220-3928

Denis A. Kravchuk, Doctor of Sciences (Engineering), Institute of Nanotechnology, Electronics and Instrumentation of the Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation,
e-mail: kravchukda@sfedu.ru,
ORCID: 0000-0002-4220-3928

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-81-105>

УДК 004.89

Мультимодальный классификатор риска кардиореспираторных заболеваний с учетом сопутствующих заболеваний и эффекта синергии

Е. В. Петрунина¹, О. В. Шаталова² ✉, Хайдер А. Х. Алавси², В. В. Песок²,
А. А. Кузьмин², Л. В. Шульга¹

¹ Московский политехнический университет
ул. Большая Семёновская, д. 38, г. Москва 107023, Российская Федерация

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

✉ e-mail: shatolg@mail.ru

Резюме

Цель исследования – развитие методов синтеза мультимодальных классификаторов для оценки риска кардиореспираторных заболеваний с учетом коморбидности.

Методы. Разработан метод синтеза классификатора риска внебольничной пневмонии с учетом коморбидности. Метод отличается вводом дополнительного фактора риска, представленного двухконтурной нелинейной моделью реальных факторов риска, с последующим синтезом слабых классификаторов на ее основе. Метод позволяет построить мультимодальный классификатор риска внебольничной пневмонии, который учитывает взаимное влияние коморбидных заболеваний на суммарный риск. Для построения слабых классификаторов предложено использовать полносвязную нейронную сеть Хопфилда, отличающуюся многосвязной структурой и двумя задержками на один такт, управляемыми парафазным генератором (с противофазными выходами), обеспечивающими запись в регистры задержек рисков с выходов нейронной сети Хопфилда со сдвигами на один такт. Для обучения слабых классификаторов с нейронной сетью Хопфилда разработан алгоритм, позволяющий обеспечить заданные показатели точности классификации и заданные показатели устойчивости нейронной сети.

Результаты. В ходе экспериментальных исследований мультимодального классификатора риска внебольничной пневмонии с четырьмя сегментами факторов риска было установлено, что при использовании всех сегментов факторов риска все используемые показатели качества классификации риска внебольничной пневмонии превышают величину 0,8 по всем группам наблюдения. Показатели качества классификации риска артериальной гипертензии как сопутствующего заболевания превышают показатели качества шкалы SCORE в одних и тех же контрольных группах в среднем на 11%.

Заключение. Использование метода синтеза слабого классификатора медицинского риска с учетом коморбидности в мультимодальном классификаторе риска кардиореспираторных заболеваний открывает новые возможности для доступной и объективной диагностики заболеваний системы дыхания и сердечно-сосудистых заболеваний, расширяя возможности интеллектуальных систем поддержки принятия клинических решений как при терапии, так и при реабилитации.

Ключевые слова: внебольничная пневмония; артериальная гипертензия; коморбидность; мультимодальный классификатор; нейронная сеть; алгоритм; модель виртуального фактора риска.

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

Финансирование: Исследования выполнены в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» программы стратегического академического лидерства «Приоритет – 2030».

Для цитирования: Мультимодальный классификатор риска кардиореспираторных заболеваний с учетом сопутствующих заболеваний и эффекта синергии / Е. В. Петрунина, О. В. Шаталова, Хайдер А. Х. Алавси, В. В. Песок, А. А. Кузьмин, Л. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 2. С. 81–105. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-81-105>

Поступила в редакцию 10.04.2024

Подписана в печать 06.05.2024

Опубликована 28.06.2024

Multimodal risk classifier for cardiorespiratory diseases taking into account concomitant diseases and synergy effect

Elena V. Petrunina¹, Olga V. Shatalova²✉, Hayder A. H. Alawsi²,
Valeriya V. Pesok², Alexander A. Kuzmin², Leonid V. Shulga²

¹ Moscow Polytechnic University
38 Bol'shaya Semenovskaya Str., Moscow 107023, Russian Federation

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

✉ e-mail: shatolg@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop a methodology for classifying complexly structured halftone images based on a multimodal approach using methods of morphological analysis, spectral analysis and neural network modeling.

Methods. A method for classifying the contours of the boundaries of segments of a complexly structured image is described. The method is based on the fact that in chronic diseases of the pancreas, there is a violation of the integrity of the contour of its border and its waviness increases due to retractions and bulges caused by an alternative inflammatory process. The method includes the stages of normalization of ultrasound images and image segmentation with the selection of the contour of the object of interest. To classify the contour of a segment boundary, it is proposed to use Fourier analysis and neural network technologies. The method is illustrated using the example of classifying the contour of the border of the pancreas on its transcutaneous acoustic image.

Results. Experimental studies of the proposed methods and means for classifying medical risk were carried out on diagnostic tasks according to the following classes: "chronic pancreatitis" – "without pathology". For experimental studies, video sequences of ultrasound images of the pancreas provided by an endoscopist were used. The purpose of the experimental studies was to analyze the classification quality indicators of image classifiers with class segments "Chronic pancreatitis" and "Without pathology". The training sample of video images (frames of video sequences) included 200 examples, one hundred from each class. The quality indicator "Sensitivity" of classification for two classes is 85,7%, the indicator "Specificity" is 87,1%.

Conclusion. The use of the contour analysis method in classifiers of ultrasound images of the pancreas opens up new opportunities for accessible and objective diagnosis of pancreatic diseases, expanding the capabilities of intelligent clinical decision support systems.

Keywords: community-acquired pneumonia; hypertension; comorbidity; multimodal classifier; neural network; algorithm; a virtual risk factor model.

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

Funding: The research was carried out within the framework of the development program of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Southwestern State University" of the strategic academic leadership program "Priority – 2030".

For citation: Petrunina E.V., Shatalova O.V., Alawsi Hayder A.H., Pesok V.V., Kuzmin A.A., Shulga L.V. Multimodal risk classifier for cardiorespiratory diseases taking into account concomitant diseases and synergy effect. *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):81–105. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-81-105>

Received 10.04.2024

Accepted 06.05.2024

Published 28.06.2024

Введение

В современной медицине под коморбидностью понимают сосуществование у пациента двух или более заболеваний вне зависимости от активности каждого из них, взаимосвязанных между собой или совпадающих по времени у одного пациента [1]. В настоящее время исследователей стала привлекать роль хронических сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ) на риск неблагоприятного исхода внебольничной пневмонии (ВП). В ряде исследований показано, что имеющаяся хроническая сердечно-сосудистая патология у умерших пациентов с ВП

встречается в 3 раза чаще, чем у умерших пациентов, не имеющих сердечно-сосудистой патологии [2]. Проведенные исследования указывают на существенную роль артериальной гипертензии (АГ) на увеличение длительности легочной инфильтрации, на развитие осложнений и на прогноз исхода ВП. В [3] показано, что кумулятивный риск АГ значительно увеличивает риск неблагоприятного исхода заболевания системы дыхания (СД) и наоборот. На рисунке 1 показаны кривые кумулятивного риска (КР) наступления конечной точки (КТ) у пациентов с АГ в зависимости от наличия патологии СД.

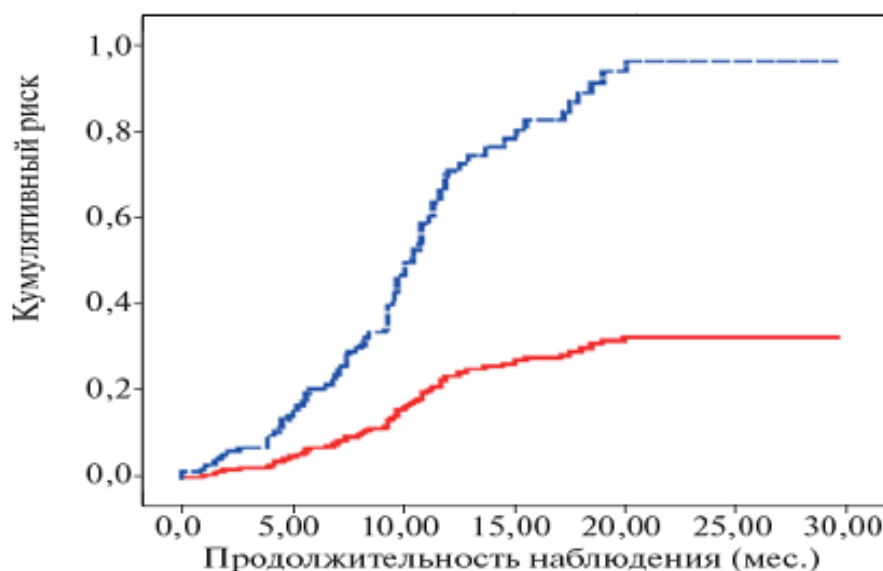


Рис. 1. Кривые кумулятивного риска наступления конечной точки у пациентов с артериальной гипертензией в зависимости от наличия хронических заболеваний системы дыхания: — АГ; — АГ+ ВП

Fig. 1. Curves of the cumulative risk of the end point in patients with arterial hypertension depending on the presence of chronic diseases of the respiratory system: — arterial hypertension; — arterial hypertension + community-acquired pneumonia

Известно, что факторы риска (ФР) кардиореспираторных заболеваний часто коррелируют друг с другом, а в некоторых случаях непосредственно влияют друг на друга, что приводит либо к усилению, либо к ослаблению частного риска по данному ФР [4; 5; 6; 7; 8; 9]. Эффект этого влияния может выражаться как в увеличении доли КР, связанного с этим ФР, так и ослаблении сочетанного ФР на риск ССЗ. Этот эффект может наблюдаться как на «сырых» данных, т. е. на результатах классификации медицинского риска (МР) агентами нижнего иерархического уровня, так и на более высоких иерархических структурах.

Материалы и методы

Для оценки влияния риска одного заболевания на риск другого заболевания используют два подхода, оба из которых должны учитывать тот факт, что коморбидные заболевания не только усиливают взаимные МР, но и имеют ряд одинаковых ФР. Поэтому первый подход основан на том, что наличие коморбидности приводит к усилению или снижению влияния ФР на МР коморбидного заболевания. Такой подход позволяет учитывать синергетический эффект на входе классификатора МР [10]. Вторым подходом учета влияния коморбидности на МР предусматривает учет синергии на основе учета выходов слабых классификаторов (weak classifiers) МР.

Рассмотрим подробнее первый подход. Формально синергетический эффект может быть учтен вводом M

дополнительных (виртуальных) ФР в виде некоторых функций (моделей) от реальных ФР: $f_1(X_1, X_2, \dots, X_N), f_2(X_1, X_2, \dots, X_N), \dots, f_m(X_1, X_2, \dots, X_N), \dots, f_M(X_1, X_2, \dots, X_N)$. Здесь $X_1, X_2, \dots, X_N$ – множество реальных факторов риска количеством N . В качестве моделей виртуальных ФР используем частные функции влияния Z_{ij} и Z_{ji} i -го ФР на j -й ФР и наоборот, определяемые по следующим формулам:

$$\begin{aligned} Z_{ij} &= a_{ii}X_i + a_{ij}X_j + b_{ij}X_iX_j, \\ Z_{ji} &= a_{ji}X_i + a_{jj}X_j + b_{ji}X_iX_j. \end{aligned} \quad (1)$$

При использовании формул (1) целесообразно осуществить масштабирование ФР таким образом, чтобы они находились в одном динамическом диапазоне, например, по формуле

$$\hat{X}_i = \frac{X_i - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)}. \quad (2)$$

Уравнения (1) позволяют получить виртуальные ФР (ВФР) – Z_{ij} и Z_{ji} . Используя (1), можем построить соответствующие слабые классификаторы, которые назовем классификаторами синергетических каналов (СК). При этом в качестве операндов в левой части уравнений (1) могут рассматриваться ФР, полученные на любом иерархическом уровне мультимодального классификатора риска (ММК). При этом Z_{ij} и Z_{ji} – это разные ВФР, т. е.

$$Z_{ij} \neq Z_{ji}. \quad (3)$$

При учете коморбидности обычно рассматриваются только два сочетанных заболевания, поэтому на входах

синергетических каналов присутствуют либо два скаляра, либо два вектора, определяющие дополнительный риск в результате синергии. Коэффициенты в (1) определяются в процессе построения моделей СК, которые строятся либо на парадигме обучаемых классификаторов, либо на основе алгоритмов математического моделирования мультипараметрических данных, например, методе группового учета аргументов (МГУА) [5; 7; 8]. Формальная модель влияния ФР друг на друга на примере двух ФР: x_1 и x_2 , представлена на рисунке 2. В этой модели ФР модифицируют друг друга посредством ввода двух функций влияния $f_1(x_1, x_2)$ и $f_2(x_1, x_2)$ [11]. Определив согласно (1) новые информативные признаки, вычисляем частные

коэффициенты уверенности $KU_{1\omega_\ell}$ и $KU_{2\omega_\ell}$ в риске заболевания класса ω_ℓ . В результате их агрегирования получаем частный риск KU_{ω_ℓ} по ФР x_1 и x_2 .

При реализации такого подхода возникает ряд трудностей, связанных с взаимодействием функций влияния и частных коэффициентов уверенности: это взаимодействие может приводить к изменению величины ФР или к модификации слабого классификатора, связанного с этим ФР. Учитывая, что ФР много, то необходимо модифицировать ФР с учетом всех остальных ФР, поэтому очень сложно определить соответствующие функции влияния, используя парадигмы машинного обучения (МО) [12; 13] или экспертного оценивания [14; 15].

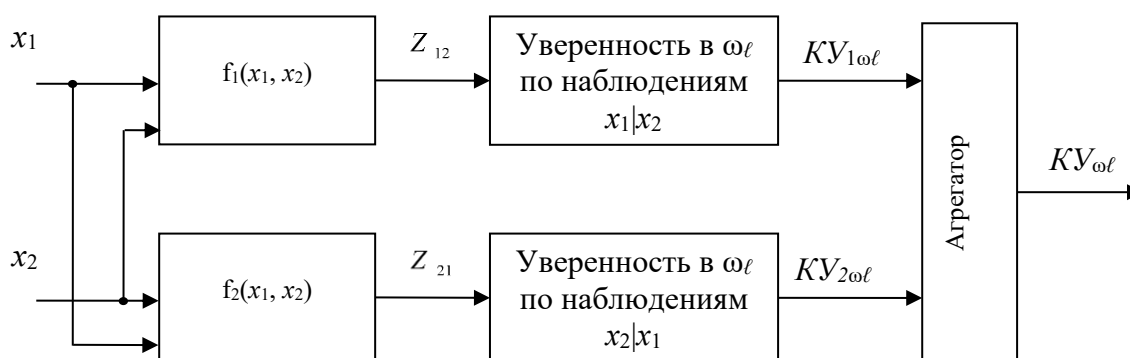


Рис. 2. Схема взаимодействия двух факторов риска в иерархической системе принятия решений

Fig. 2. Scheme of interaction of two risk factors in a hierarchical decision-making system

Как уже было написано выше, второй подход учета влияния коморбидности на МР предусматривает учет синергии на основе учета выходов слабых классификаторов МР. При этом риск коморбидных заболеваний описывается математическими моделями (линейными или нелинейными), например, моделями многомерной линейной регрессии, в

которых МР коморбидных заболеваний $R1$ и $R2$ входят в виде скалярных составляющих:

$$\begin{cases} R1 = [A1] \cdot [X1]^T + [B1] \cdot [X3]^T + c1 \cdot R2, \\ R2 = [A2] \cdot [X2]^T + [B2] \cdot [X3]^T + c2 \cdot R1, \end{cases} \quad (4)$$

где $X1$ и $X2$ – векторы специфических ФР для МР $R1$ и $R2$; $X3$ – вектор общих ФР для МР $R1$ и $R2$; $A1, A2, B1, B2$ –

матрицы коэффициентов многомерной линейной модели рисков коморбидных заболеваний; c_1 и c_2 – коэффициенты, учитывающие взаимное влияние МР коморбидных заболеваний.

Учитывая, что в системе уравнений (4) независимыми являются коэффициенты при предикторах риска, т. е. A_1, A_2, B_1, B_2 и c_1 и c_2 , система алгебраических уравнений (4) является нелинейной. Для описания методики ее решения запишем (4) в наиболее простом варианте, когда векторы ФР X_1, X_2, X_3 являются скалярами:

$$\begin{cases} R_1 = a_1 \cdot x_1 + b_1 \cdot x_3 + c_1 \cdot R_2, \\ R_2 = a_2 \cdot x_2 + b_2 \cdot x_3 + c_2 \cdot R_1. \end{cases} \quad (5)$$

Осуществив переход в правых частях уравнений (5) к одной зависимой переменной, получим

$$\begin{cases} R_1 = \frac{a_1}{1-c_1 \cdot c_2} \cdot x_1 + \frac{a_2 \cdot c_1}{1-c_1 \cdot c_2} \cdot x_2 + \frac{b_1+b_2 \cdot c_1}{1-c_1 \cdot c_2} \cdot x_3, \\ R_2 = \frac{a_2}{1-c_1 \cdot c_2} \cdot x_2 + \frac{a_1 \cdot c_2}{1-c_1 \cdot c_2} \cdot x_1 + \frac{b_2+b_1 \cdot c_2}{1-c_1 \cdot c_2} \cdot x_3. \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, каждый объект (пациент) имеет две метки – R_1 и R_2 . В результате построения моделей, соответствующих системам уравнений (4), (5) и (6), необходимо определить коэффициенты при трех ФР, которые удовлетворяли бы априорно выбранным показателям качества этих моделей. Концептуальная модель классификатора представлена ниже (рис. 3).

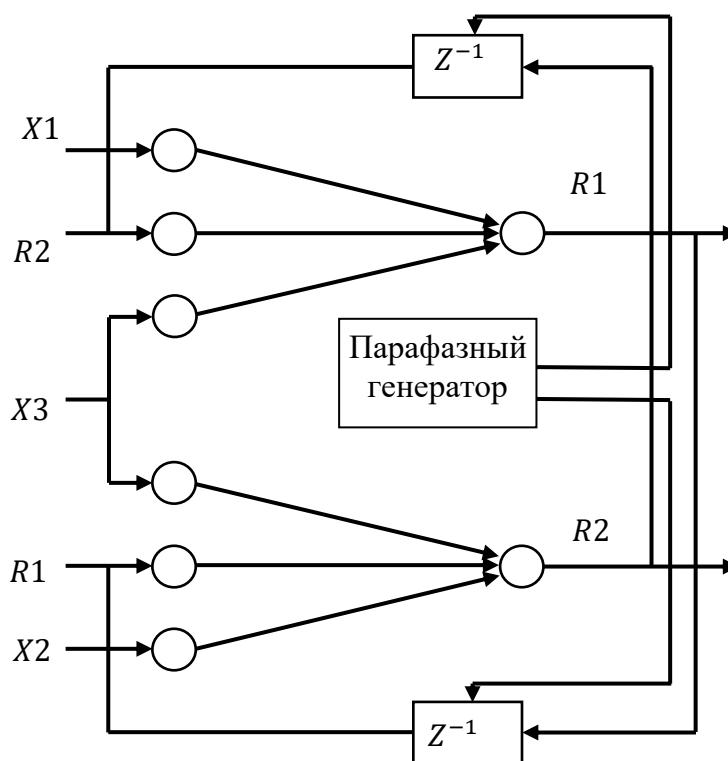


Рис. 3. Концептуальная модель классификатора медицинского риска с учетом синергетического эффекта на основе структуры сети Хопфилда

Fig. 3. Conceptual model of a medical risk classifier taking into account the synergistic effect based on the structure of the Hopfield network

Модель отвечает системе уравнений (5). Характерной особенностью этой модели является наличие задержек на один такт Z^{-1} . Задержки управляются парафазным генератором, на входах которого присутствуют противофазные импульсы, управляющие записью данных с выходов классификатора рисков в регистры задержек. Формально модель рисунка 3 можно рассматривать как одну нейронную сеть (НС) со структурой Хопфилда [16; 17] или как две НС с многосвязной структурой. И в том и в другом случае в структуре НС должна быть предусмотрена задержка на один такт и проведена проверка условия на устойчивость сети.

Под устойчивостью НС здесь понимается процесс обучения сети, в результате выполнения которого приращения переменных на ее выходах по каждому примеру стремятся к нулю. На рисунке 4 показан процесс изменения (динамика) показателей риска $R1$ и $R2$ на выходе синергетических классификаторов от эпохи к эпохе при устойчивой НС: $\Delta R1_k = R1_{k+1} - R1_k$; $\Delta R2_k = R2_{k+1} - R2_k$, где $k = 0, 1, \dots, i-1$ – номер эпохи обучения; i – число эпох обучения, определяемое в блоке 6 согласно схеме алгоритма (рис. 5).

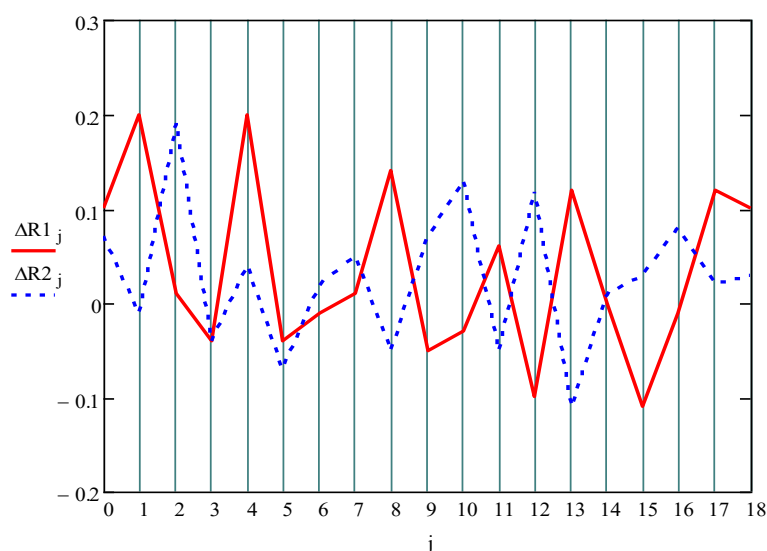


Рис. 4. Эпюры динамики показателей риска на выходе синергетических классификаторов от эпохи к эпохе

Fig. 4. Diagrams of the dynamics of risk indicators at the output of synergetic classifiers from epoch to epoch

Для обучения НС сформируем обучающую выборку пациентов с коморбидными заболеваниями, при этом будем кодировать наличие коморбидного заболевания единицей, а его отсутствие – нулем. В таком случае в выборке будут присутствовать пациенты, относящиеся к

четырем классам: 00, 01, 10 и 11. При этом к классу коморбидных пациентов относятся только пациенты с кодом 11, а пациенты с кодом 00 относятся к классу здоровых, т. е. не больных ни ВП, ни АГ. В таблице 1 представлена структура данных в обучающей выборке.

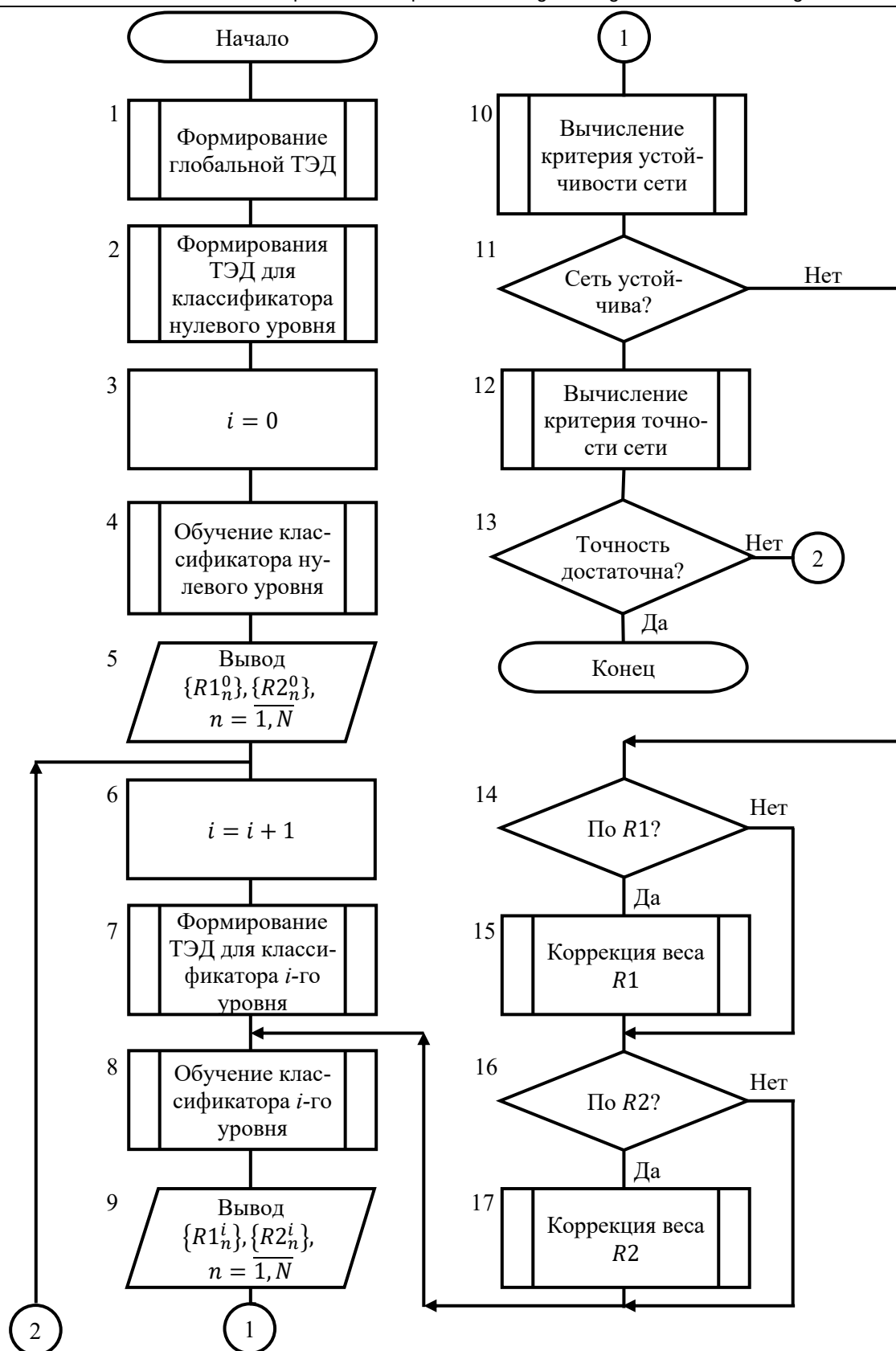


Рис. 5. Схема алгоритма синтеза синергетического классификатора

Fig. 5. Scheme of the synergetic classifier synthesis algorithm

Таблица 1. Структура данных в обучающей выборке для синтеза синергетического классификатора**Table 1.** Data structure in the training set for the synthesis of a synergetic classifier

№ п/п пациентов	Переменные модели классификатора				
	$X1$	$X2$	$X3$	$R1$	$R2$
1	***	***	***	0	1
2	***	***	***	0	0
3	***	***	***	1	0
...	...	...	...	...	...
n	***	***	***	1	1
...	...	...	...	...	...
N	***	***	***	0	1

После формирования таблицы 1 приступаем к обучению классификаторов риска $R1$ и $R2$ (схема алгоритма на рис. 5), структура которых представлена на рисунке 6. Эти классификаторы

назовем классификаторами нулевого уровня и обозначим их выходы как $R1^0$ и $R2^0$. Для их обучения необходимо из таблицы 1 сформировать две таблицы экспериментальных данных (ТЭД).

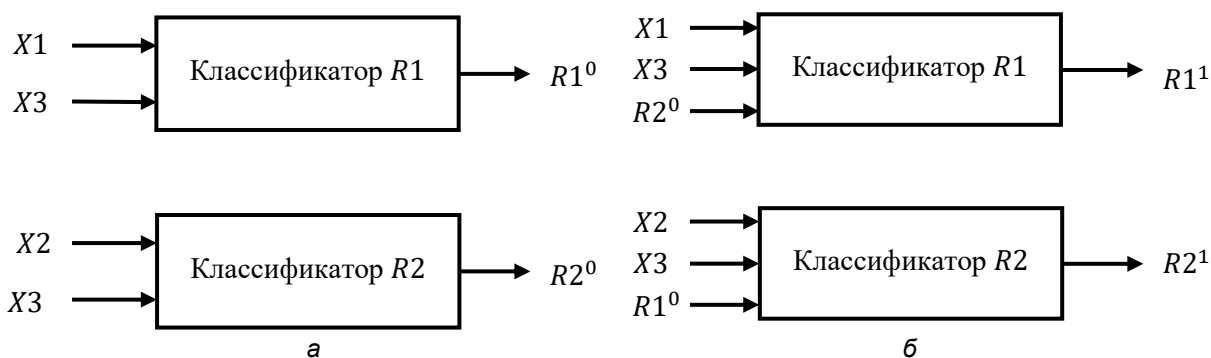


Рис. 6. Структурная схема синергетических классификаторов: а – для нулевого шага обучения; б – для первого и последующих шагов обучения

Fig. 6. Block diagram of synergetic classifiers: а – for the zero learning step; б – for the first and subsequent learning steps

Первая ТЭД предназначена для обучения классификатора риска $R1$, а вторая ТЭД – для классификатора риска $R2$. В первую ТЭД входят пациенты с кодами риска 00 и 10, а во вторую ТЭД – 00 и 01. При этом из первой ТЭД исключаются столбцы $X2$ и $R2$, а из второй ТЭД – столбцы $X1$ и $R1$.

После обучения классификаторов нулевого уровня, структура которых представлена на рисунке 6, а, переходим к обучению классификаторов первого уровня. Классификаторы первого уровня

построены по схеме (рис. 3) и объединены в один классификатор. Его схема представлена на рисунке 6, б.

В таблице 2 приведена структура данных для синергетических классификаторов первого уровня. Такую же структуру данных имеют классификаторы всех последующих уровней, которые строятся по аналогичной схеме с учетом того, что для классификатора i -го уровня на входы подаются риски, определенные классификатором $i-1$ -го уровня.

Таблица 2. Структура данных обучающей выборки для первого и последующих уровней**Table 2.** Structure of the training sample data for the first and subsequent levels

№ п/п пациентов	Переменные модели классификатора						
	$X1$	$X2$	$X3$	$R1^i$	$R2^i$	$R1$	$R2$
1	***	***	***	0,2	0,8	0	1
2	***	***	***	0,1	0,25	0	0
3	***	***	***	0,85	0,2	1	0
...	...	...	...	...	...	...	...
n	***	***	***	0,85	0,85	1	1
...	...	...	...	...	...	...	...
N	***	***	***	***	***	***	***

Для перехода к построению классификатора следующего уровня проверяются показатели качества классификации классификатора текущего уровня, а также проверяется устойчивость модели классификатора по следующим формулам:

$$K1_s = \frac{1}{\lambda + 1} \sum_{k=s}^{s+\lambda} (\Delta R1_{k+1} \cdot \Delta R2_k), \quad (7)$$

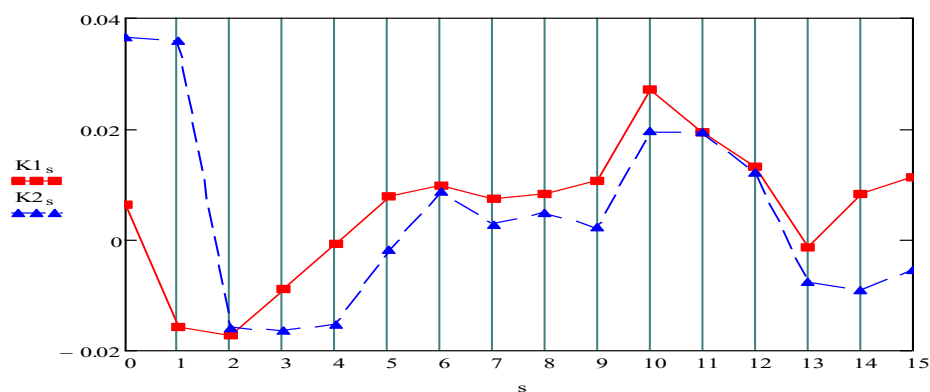
$$K2_s = \frac{1}{\lambda + 1} \sum_{k=s}^{s+\lambda} (\Delta R1_k \cdot \Delta R2_{k+1}), \quad (8)$$

где $s=0 \dots i-2$; $\lambda=0$ при $i=2$, $\lambda=1$ при $i=3$, $\lambda=2$ при $i \geq 4$.

Показатели (7) и (8) определяются в блоке 10 алгоритма рисунка 5 и при неудовлетворительной устойчивости, т. е.

когда критерий устойчивости превышает пороговое значение, что показывает наличие положительной обратной связи; лицо, принимающее решение (ЛПР) в блоках 15 и 17, может ослабить ее влияние. На рисунке 7 показаны эпюры динамики показателей устойчивости модели классификатора от эпохи к эпохе. При удовлетворительной точности модели и при удовлетворении показателя критерия устойчивости процесс обучения НС с синергетическими каналами заканчивается.

Структурная схема ММК риска ВП, предназначенная для адаптивной БТС реабилитационного типа, учитывающая синергетический фактор, представлена ниже рисунке 8.

**Рис. 7.** Эпюры динамики показателей устойчивости модели классификатора от эпохи к эпохе**Fig. 7.** Diagrams of the dynamics of stability indicators of the classifier model from epoch to epoch

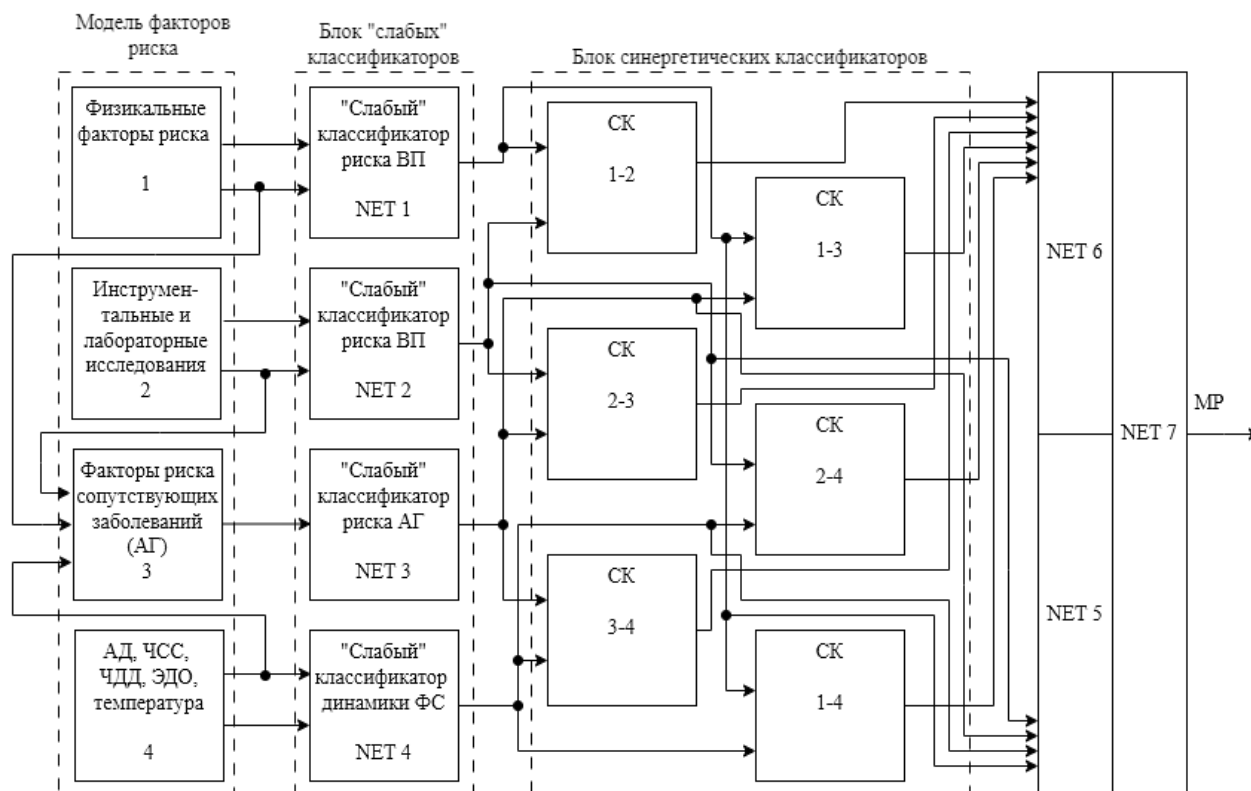


Рис. 8. Структурная схема модели мультимодального классификатора риска ВП

Fig. 8. Block diagram of the model of the multimodal risk classifier for community-acquired pneumonia

Среди ФР ВП выделяют более ста показателей. К наиболее значимым из них относят характер начала заболевания, степень дыхательной недостаточности, показатели АД, индекс массы тела (ИМТ), показатели рентгенографических исследований, показатели клинического анализа крови, возраст [12]. Что же касается ФР АГ, то, согласно исследованиям, проведенным в [18], к основным значимым ФР АГ были отнесены: возраст, курение, показатели АД, стресс, уровень холестерина, ИМТ, наследственность, атеросклероз и другие хронические заболевания.

В связи с этим в пространстве ФР было выделено четыре сегмента. Они разделены на «неизменяемые» (эти ФР в процессе лечения или реабилитации остаются постоянными и не влияют на

динамику риска заболевания) – сегменты 1...3 – и оперативные, которые могут «мгновенно» реагировать на изменение функционального состояния (ФС) – сегмент четыре. В первый сегмент ФР включены физикальные ФР, во второй – ФР, определяемые посредством инструментальных и лабораторных исследований [19].

Третий сегмент ФР ВП содержит предикторы риска сопутствующего заболевания, в качестве которого выбрана АГ. В сегменте четыре используются показатели, «моментально» реагирующие на экзогенные или эндогенные воздействия: АД, частота пульса (ЧСС), частота дыхательных движений (ЧДД), эндодермальный ответ (ЭДО). Формирователи дескрипторов на основе ЭДО рассмотрены в [20].

Решения слабых классификаторов в ММК со структурой (рис. 8) агрегируются сильными классификаторами (strong classifiers) NET 5, NET 6, NET 7, которые могут быть построены на любой парадигме [12; 21]. Пример

структуры агрегатора NET 5 показан ниже (рис. 9). Полагаем, что классификаторы нижнего иерархического уровня NET 1, NET 2, NET 3 и NET 4 дифференцируют риск ВП на три уровня: высокий, средний, низкий.

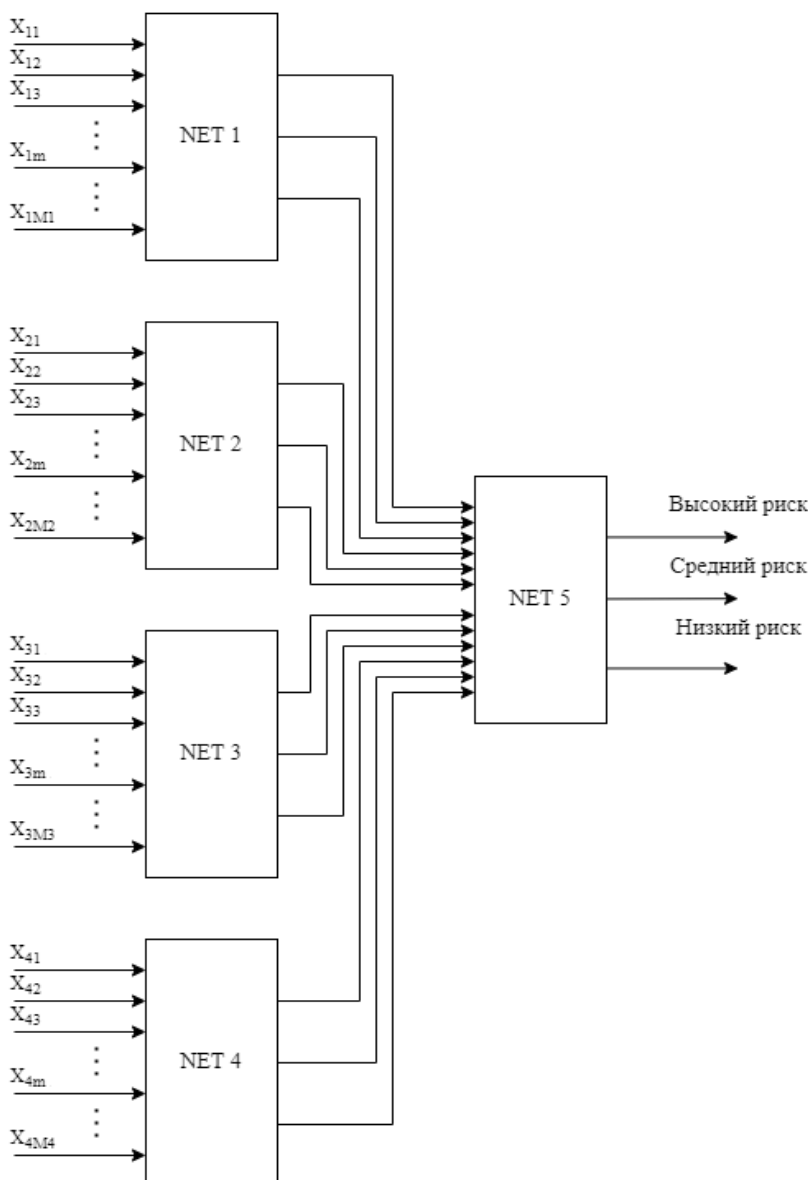


Рис. 9. Структурная схема нейронной сети в качестве классификатора риска внебольничной пневмонии

Fig. 9. Block diagram of a neural network as a risk classifier for community-acquired pneumonia

Для оценки риска ВП формируют четыре сегмента ФР (рис. 8), определяются соответствующие им дескрипторы, которые поступают на входы слабых

классификаторов NET 1, NET 2, NET 3 и NET 4. Например, для формирования дескриптора для слабого классификатора по функции принадлежности (ФП) ФР

x_1 – «возраст», которая представлена на рисунке 10, воспользуемся формулой Байеса:

$$КУ_{ВП}(x_1) = \frac{P_{ВП}(\text{фон}) \cdot P(x_1|ВП)}{P(x_1)}, \quad (9)$$

где $P_{ВП}(\text{фон})$ – априорная вероятность ВП по популяции; $P(x_1|ВП)$ – вероятность того, что возраст больного ВП в популяции равен x_1 ; $P(x_1)$ – гистограмма распределения возраста в популяции [13].

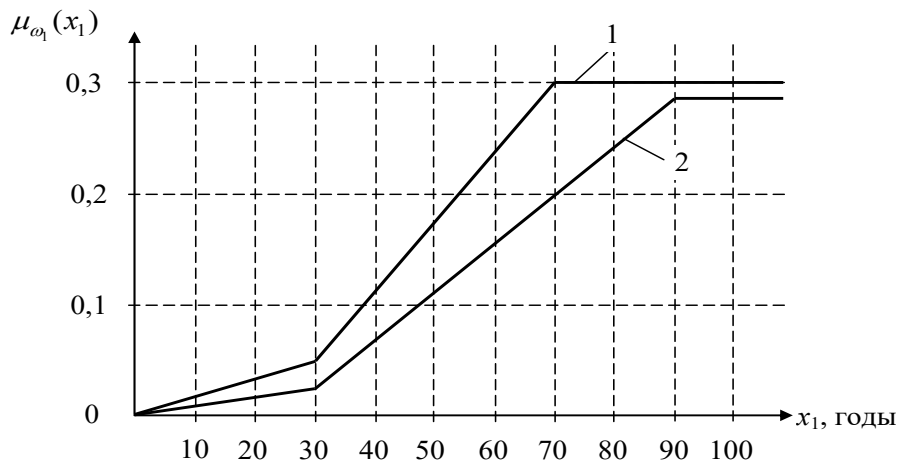


Рис. 10. Графики функций принадлежности по базовой переменной «возраст» к классу ω_1 – «ВП» для мужчин (1) и женщин (2)

Fig. 10. Graphs of membership functions for the basic variable "age" by class ω_1 – "C-AP" for men (1) and women (2)

Блочно-иерархическая структура классификаторов (рис. 9) синтезируется в два этапа (схема алгоритма на рис. 11).

Сначала обучаются классификаторы NET 1...NET 4 по дескрипторам, определяемым, например, по формуле (9), а затем обучается NET 5. Структура

ТЭД для обучения классификаторов NET 1...NET 4 (рис. 9) представлена в таблице 3 (формируется в блоке 1 – рис. 11). Последний столбец таблицы 3 заполняется по результатам тестирования NET 1 и переносится в таблицу 4.

Таблица 3. Структура данных для обучения нейронных сетей NET 1...NET 4

Table 3. Data structure for training neural networks NET 1...NET 4

NN образцов	Вход 1 NET 1	Вход 2 NET 1	. . .	Вход M1 NET 1	Цель	Выход NET 1
1	$(X_{11})_1$	$(X_{12})_1$	. . .	$(X_{1M1})_1$	0	0
2	$(X_{11})_2$	$(X_{12})_2$	. . .	$(X_{1M1})_2$	1	1
.	.	.	. . .	.	.	.
.	.	.	. . .	.	.	.
.	.	.	. . .	.	.	.
L	$(X_{11})_L$	$(X_{12})_L$	. . .	$(X_{1M1})_L$	1	1



Рис. 11. Схема алгоритма синтеза мультимодального классификатора риска внебольничной пневмонии

Fig. 11. Scheme of the synthesis algorithm for a multimodal risk classifier for community-acquired pneumonia

В таблице 4 представлена структура данных в обучающих и контрольных выборках для обучения НС второго

иерархического уровня (на рис. 9 это NET 5).

Таблица 4. Структура данных для обучения нейронной сети NET 5

Table 4. Data structure for training the NET 5 neural network

NN образцов	Выход NET 1	Выход NET 2	Выход NET 3	Выход NET 4	Цель
1	NET 1-1	NET 2-1	NET 3-1	NET 4-1	0
2	NET 1-2	NET 2-2	NET 3-2	NET 4-2	1
.	.	.	...	.	.
.	.	.	...	.	.
.	.	.	...	.	.
L	NET 1-L	NET 2-L	NET 3-L	NET 4-L	1

В блоках 2 и 3 выполняется обучение классификаторов NET 1...NET 4 по ТЭД со структурой таблицы 3. Последний столбец таблицы 3 заполняется после формирования контрольных выборок в блоке 4. По результатам их классификации NET 1...NET 4 формируют ТЭД для NET 5 (блоки 5, 6) со структурой таблицы 4. В блоке 7 осуществляется обучение классификатора NET 5.

Агрегатор NET 6 (рис. 8), аналогично NET 5 агрегирует решения СК. Каждый СК, так же как и классификаторы NET 1...NET 4 на рис. 9, имеет три выхода, соответствующие трем классам риска ВП. Решения NET 5 и NET 6 агрегируются в NET 7 (рис. 8). Алгоритмы настройки NET 5, NET 6 и NET 7 аналогичны алгоритму рисунка 11.

Для настройки НС использовался программный продукт *Neurowork*, разработанный в среде MATLAB на кафедре биомедицинской инженерии Юго-Западного государственного университета. Он включает в себя пять модулей, каждый из которых обеспечивает выполнение определенного этапа построения ММК [14; 22]. В качестве примера на рисунках 12 и 13 представлены интерфейсные окна двух из этих модулей. Модуль *GuiData* работает с обучающими и контрольными датасетами, предназначенными для обучения и валидации ММК. Модуль *GuiNet* предназначен для обучения и тестирования НС, а также для классификации неизвестных образцов.

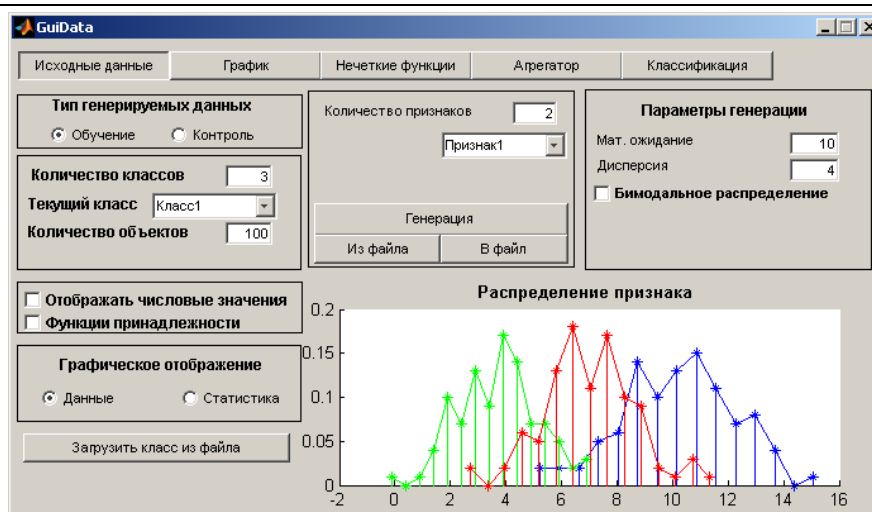


Рис. 12. Графический интерфейс модуля GuiData

Fig. 12. Graphical interface of the GuiData module

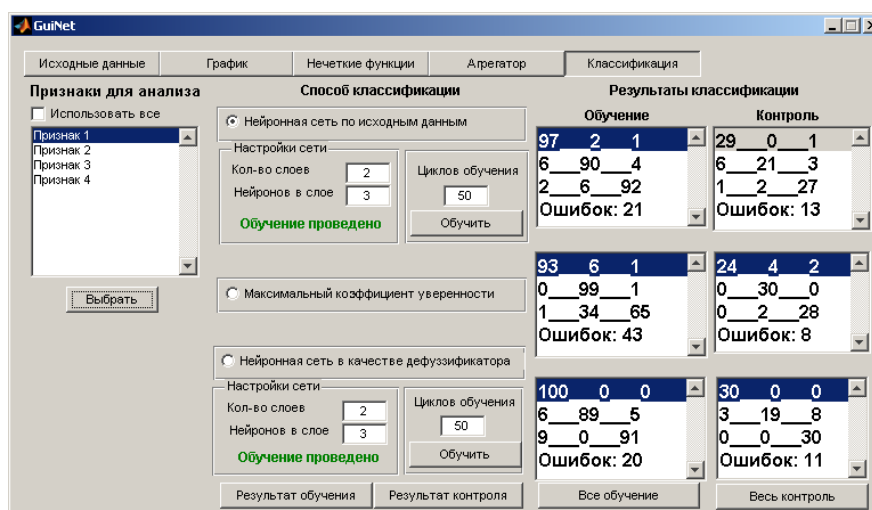


Рис. 13. Графический интерфейс модуля GuiNet

Fig. 13. Graphical interface of the GuiNet module

Глобальные параметры НС задаются в окне *GuiNet* (транспаранты ввода в центре окна). В локальных окнах в правой части интерфейсного окна выводятся показатели качества классификации по каждому классу для обучающей и тестовой выборки.

Результаты и их обсуждение

Для оценки показателей качества классификации разработанных ММК ВП: диагностической чувствительности

(ДЧ), диагностической специфичности (ДС) и диагностической эффективности (ДЭ) – была создана экспериментальная группа в количестве 400 пациентов. Экспериментальная группа формировалась по результатам ретроспективных исследований. Больные в экспериментальной группе были разделены по риску ВП на три класса. По 30% больных были отнесены к классам «высокий риск» и «средний риск», у 40% пациентов был установлен класс «низкий риск» ВП. При

стратификации групп на классы исходили из того, что в каждом классе должно быть не менее ста пациентов.

Диагностические характеристики ММК определялись для экспериментальной и контрольной выборок. Для оценки влияния на диагностические показатели ММК слабых классификаторов сопутствующих заболеваний, контрольная выборка формировалась из

пациентов с подтвержденным диагнозом АГ. Результаты классификации ММК ВП на обучающей выборке приведены в таблице 5 (в числителе). Результаты классификации риска ВП сравнивались с балльной шкалой PSI, на которой также были выделены три градации степени тяжести ВП (результаты приведены в знаменателе).

Таблица 5. Экспериментальные данные по классификации риска внебольничной пневмонии на обучающей выборке

Table 5. Experimental data on the risk classification of community-acquired pneumonia on the training set

Обследуемые	Высокий риск	Средний риск	Низкий риск
$n_{\omega_1}^1 = 120$ (высокий риск)	101/84	19/28	0/8
$n_{\omega_2}^2 = 120$ (средний риск)	11/23	99/85	10/12
$n_{\omega_3}^3 = 160$ (низкий риск)	5/16	25/28	130/116
Всего	117/123	143/141	140/136

Сравнение показателей качества классификации ММК при классификации АГ как с прототипом осуществлялось с известной шкалой риска CC3 SCORE [6; 7]. Высокий риск АГ соответствовал риску по шкале SCORE более 10%, а низкий – менее одного процента.

Средний риск соответствовал участку шкалы SCORE между этими диапазонами. Показатели качества классификации АГ для модели ММК (числитель) и шкалы SCORE знаменатель, используемые в качестве аналога, представлены ниже (табл. 6).

Таблица 6. Показатели качества классификации артериальной гипертензии на обучающей и контрольной выборках мультимодального классификатора и шкалы SCORE

Table 6. Quality indicators for the classification of arterial hypertension on the training and control samples of the multimodal classifier and the SCORE scale

Класс	Обучающая выборка			Контрольная выборка		
	ДЧ,%	ДС,%	ДЭ,%	ДЧ,%	ДС,%	ДЭ,%
$n_{\omega_1}^1$	84/70	96/86	82,5/71	82/71	96/87	87/73
$n_{\omega_1}^2$	82,5/71	80/80		84/70	90/81	
$n_{\omega_1}^3$	81/72,5	92/90,2		84/73	95/92	

Таким образом, модель ММК по всем показателям качества классификации на всех экспериментальных и контрольных группах пациентов достигает величины не менее 0,8. Показатели качества классификации ММК по классификации риска АГ в среднем выше, чем у известной системы SCORE, на 11%, что позволяет рекомендовать их для использования в системах мониторинга и контроля эффективности терапии и реабилитации пациентов с кардиореспираторными заболеваниями.

Выводы

1. Разработан метод синтеза классификатора риска внебольничной пневмонии с учетом коморбидности, отличающийся тем, что синергетический эффект на риск внебольничной пневмонии сочетанного заболевания учитывается вводом дополнительных (виртуальных) факторов риска, представленных нелинейной моделью реальных факторов риска, с последующим синтезом слабых классификаторов на их основе, позволяющий построить мультимодальный классификатор риска внебольничной пневмонии, учитывать взаимное влияние коморбидных заболеваний на суммарный риск кардиореспираторного заболевания.

2. Для построения слабых классификаторов, позволяющих учесть эффект взаимовлияния коморбидных заболеваний на их риски, предложено использовать полносвязную нейронную сеть Хопфилда, отличающуюся многосвязной структурой и двумя задержками на один такт, управляемыми парафазным генератором с противофазными выходами, обеспечивающими запись в регистры задержек рисков с выходов нейронной сети Хопфилда со сдвигами на один такт.

3. Разработан алгоритм обучения слабого классификатора со структурой нейронной сети Хопфилда, позволяющий обеспечить заданные показатели

точности классификации при заданных показателях устойчивости нейронной сети.

4. Предложен критерий устойчивости нейронной сети Хопфилда с многосвязной структурой, заключающийся в вычислении суммы приращений рисков на ее выходах на апертуре трех эпох обучения и контроле выхода этого показателя за пределы пороговой величины.

5. Разработан мультимодальный классификатор риска внебольничной пневмонии, предназначенный для мониторинга функционального состояния пациента в процессе проведения терапевтических и реабилитационных процедур, состоящий из трех макрослоев автономных интеллектуальных агентов. Первый макрослой содержит три слабых классификатора риска внебольничной пневмонии. Для первого слабого классификатора формируются дескрипторы из данных физикального обследования. Второй слабый классификатор использует дескрипторы, полученные по результатам инструментальных и лабораторных исследований, первый из которых осуществляет анализ данных, полученных на основе физикальных исследований, второй – на основе инструментальных и лабораторных исследований, а третий – анализирует факторы риска, изменяющиеся в процессе экзогенного воздействия. Также в первом макрослое сформирован слабый классификатор сопутствующего заболевания (артериальной гипертензии) по факторам риска, совпадающим с факторами риска основного заболевания. Второй макрослой слабых классификаторов формируется синергетическими каналами, а третий макрослой агрегирует решения слабых классификаторов первых двух макрослоев.

6. Проведены исследования показателей качества классификации риска внебольничной пневмонии посредством

мультимодального классификатора на ретроспективных данных. При использовании оптимальной конфигурации мультимодального классификатора все показатели качества классификации

были не менее 0,8 и превысили показатели качества шкал PSI и SCORE в одних и тех же контрольных группах в среднем на 11%.

Список литературы

1. Абрамович С. Г., Игнатъева Т. Г. Методы аппаратной физиотерапии в лечении ишемической болезни сердца // Сибирский медицинский журнал. 2003. Т. 37, № 2. С. 4–9.
2. Соболева Л. Р., Кузьяев А. И. Осложнения у больных внегоспитальной пневмонией с летальным исходом // Международный конгресс по болезням органов дыхания. СПб., 1998. С. 24–26.
3. Результаты проспективного наблюдения больных артериальной гипертензией с сопутствующими хроническими болезнями органов дыхания в рутинной практике. Часть I. Характеристика неблагоприятных событий / М. И. Смирнова, А. С. Курехян, В. М. Горбунов, Г. Ф. Андреева, Я. Н. Кошеляевская, А. Д. Деев // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2022. № 21 (10). С. 3383. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2022-3383>
4. 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.
5. Виртуальные потоки в гибридных решающих модулях классификации сложно-структурируемых данных / А. В. Киселев, Д. Ю. Савинов, С. А. Филист, О. В. Шаталова, В. В. Жилин // Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии. 2018. № 2 (42). С. 137–149.
6. 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.
7. 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.
8. 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.

9. Heterogeneous Classifiers with Virtual Flows in Intelligent Systems for Predicting Cardiovascular Complications During the Rehabilitation Period / E. V. Petrunina, O. V. Shatalova, D. S. Zabanov, V. V. Serebrovskii // Biomedical Engineering. 2020. Vol. 54, N 3. P. 212–215. <https://doi.org/10.1007/s10527-020-10006-6>

10. Prediction of the Risk of Cardiovascular Complications with a Segmented Space of Risk Factors and Synergy Channels / O. V. Shatalova, D. A. Mednikov, Z. U. Protasova, N. S. Stadnichenko // Journal of Physics: Conference Series: II International scientific conference on applied physics, information technologies and engineering (APITECH II) (25 September – 04 October 2020 y.). Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 32042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/3/032042>

11. Нейросетевой решающий модуль для исследования живых систем / С. Г. Емельянов, А. Ф. Рыбочкин, С. А. Филист, А. Р. Халед // Известия Курского государственного технического университета. 2008. № 2 (23). С. 77–82.

12. Гибридный нейронечеткий классификатор для мониторинга эффективности лечения заболеваний системы дыхания с учетом коморбидности / Е. В. Петрунина, С. А. Филист, Л. В. Шульга, В. В. Песок, Хайдер А. Х. Алавси, А. В. Бутусов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 27–53. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-27-53>

13. Модели нечетких нейронных сетей с трехстабильным выходом в инструментарии для психологических и физиологических исследований / С. А. Филист, Х. А. Р. Салем, О. В. Шаталова, В. В. Руденко // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2007. Т. 6, № 2. С. 475–479.

14. A Method for Creating Fuzzy Neural-Network Models Using the Matlab Package for Biomedical Applications / V. V. Zhilin, S. A. Filist, K. A. Rakhim, O. V. Shatalova // Biomedical Engineering. 2008. Vol. 42, N 2. P. 64–66. <https://doi.org/10.1007/s10527-008-9019-y>

15. Гибридные нечеткие модели для прогнозирования возникновения и осложнений артериальной гипертензии с учетом энергетических характеристик биоактивных точек / М. А. Ефремов, С. А. Филист, О. В. Шаталова, Е. А. Старцев, Л. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8, № 4 (29). С. 104–119.

16. Структурно-функциональная модель для мониторинга влияния управляющих воздействий на функциональное состояние самоорганизующихся систем / П. С. Кудрявцев, А. Н. Шуткин, В. В. Протасова, С. А. Филист // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2015. № 2 (30). С. 105–118.

17. Филист С. А., Томакова Р. А., Яа З. Д. Универсальные сетевые модели для задач классификации биомедицинских данных // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4 (43), ч. 2. С. 44–50.
18. Prediction of Coronary Risk Using a Multichannel System with Redundant Decisions and Associative Choice / E. V. Petrunina, O. V. Shatalova, Z. U. Protasova, A. F. Rybochkin, V. V. Serebrovsky // Biomedical Engineering. 2020. Vol. 54, N 2. P. 140–144. <https://doi.org/10.1007/s10527-020-09991-5>
19. Вклад комбинаций факторов риска в развитие хронических неинфекционных заболеваний / О. С. Кобякова, Е. А. Старовойтова, И. В. Толмачев [и др.] // Социальные аспекты здоровья населения. 2020. № 66 (5). С. 1. <https://doi.org/10.21045/2071-5021-2020-66-5-1>
20. Диагностические системы на основе анализа вольтамперных характеристик биоактивных точек / Н. А. Корневский, С. А. Филист, О. В. Шаталова, К. Д. А. Кассим, В. В. Руденко // Биотехносфера. 2013. № 5 (29). С. 33–38.
21. Волков И. И., Емельянов С. Г., Филист С. А. Метод классификации сложных объектов на основе анализа структурных функций медленных волн // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 4. С. 6–12.
22. Биотехническая система с виртуальной реальностью в реабилитационных комплексах с искусственными обратными связями / А. А. Трифонов, Е. В. Петрунина, С. А. Филист, А. А. Кузьмин, В. В. Жилин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 4. С. 49–66.

References

1. Abramovich S.G., Ignat'eva T.G. Methods of Hardware Physiotherapy in the Treatment of Coronary Heart Disease. *Sibirskiy meditsinskiy zhurnal = Siberian Medical Journal*. 2003;37(2):4–9. (In Russ.)
2. Soboleva L.R., Kuzyaev A.I. Complications in Patients with Community-Acquired Pneumonia with Fatal Outcome. In: *Mezhdunarodnyi kongress po boleznyam organov dyhaniya = International Congress for Respiratory Diseases*. St. Petersburg; 1998. P. 24–26. (In Russ.)
3. Smirnova M.I., Kurekhyan A.S., Gorbunov V.M., Andreeva G.F., Koshelyaevskaya Y.N., Deev A.D. Prospective Follow-Up of Hypertensive Patients with Concomitant Chronic Respiratory Diseases in Routine Practice. Part I. Characterization of Adverse Events]. *Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika = Cardiovascular Therapy and Prevention*. 2022;21(10):3383. (In Russ.) <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2022-3383>
4. Komlev I.A., Shatalova O.V., Degtyaryov S.V., Serebrovskiy A.V. Prediction and Assessment of Severity of Cardiac Ischemia, Based on Hybrid Fuzzy Models. *Izvestiya Yugo-*

Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2019;9(1):133–145. (In Russ.)

5. Kiselev A.V., Savinov D.Y., Filist S.A., Spatalova O.V., Zpiln V.V. Virtual Flows in Hybrid Decision Modules of Classification of Complex-Structured Data. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = The Caspian Journal: Management and High Technologies.* 2018;2(42):137–149. (In Russ.)

6. Protasova Z.U., Shatalova O.V., Dafalla A.A.B., Degtyaryov S.V. Methods and Algorithms for the Formation of Weak Classifiers in the Ensemble of Classifiers for Predicting Cardiovascular Risk. *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(3):64–83. (In Russ.)

7. Shatalova O.V., Mednikov D.A., Protasova Z.U. Mul'tiagentnaya intellektual'naya sistema dlya prognoza riska serdechno-sosudistyh oslozhneniy s sinergeticheskimi kanalami [Multi-Agent Intelligent System for Prediction of Risk of Cardiovascular Complications with Synergy Channels]. *Sistemnyy analiz i upravlenie v biomeditsinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems.* 2020;19(3):177–188. (In Russ.)

8. Kiselev A.V., Shatalova O.V., Protasova Z.U., Filist S.A., Stadnichenko N.S. Models of Latent Predictors in Intellectual Systems for Forecasting the State of Living Systems. *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.* 2020;10(1):114–133. (In Russ.)

9. Petrunina E.V., Shatalova O.V., Zabanov D.S., Serebrovskii V.V. Heterogeneous Classifiers with Virtual Flows in Intelligent Systems for Predicting Cardiovascular Complications during the Rehabilitation Period. *Biomedical Engineering.* 2020;54(3):212–215. <https://doi.org/10.1007/s10527-020-10006-6>

10. Shatalova O.V., Mednikov D.A., Protasova Z.U., Stadnichenko N.S. Prediction of the risk of cardiovascular complications with a segmented space of risk factors and synergy channels. In: *Journal of Physics: Conference Series: II International scientific conference on applied physics, information technologies and engineering (APITECH II), 25 September – 04 October 2020.* Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited; 2020. P. 32042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/3/032042>

11. Emel'yanov S.G., Rybochkin A.F., Filist S.A., Haled A.R. Neural Network Solver Module for the Study of Living Systems. *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo*

tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Kursk State Technical University. 2008;(2):77–82. (In Russ.)

12. Petrunina E.V., Filist S.A., Shulga L.V., Pesok V.V., Alawsi Hayder A.H., Butusov A.V. Hybrid Neuro-Fuzzy Classifier for Monitoring the Effectiveness of Treatment of Diseases of the Respiratory System, Taking into Account Comorbidity. *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(4):27–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-27-53>

13. Filist S.A., Salem H.A.R., Shatalova O.V., Rudenko V.V. Modeli nechetkih neyronnyh setey s trekhstabil'nym vyhodom v instrumentarii dlya psihologicheskikh i fiziologicheskikh issledovaniy [Slipshod Neuron Networks, Having Three Stable Output, for Diagnostics of Psychical Diseases]. *Sistemnyy analiz i upravlenie v biomeditsinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2007;6(2):475–479. (In Russ.)

14. Zhilin V.V., Filist S.A., Rakhim K.A., Shatalova O.V. A Method for Creating Fuzzy Neural-Network Models Using the Matlab Package for Biomedical Applications. *Biomedical Engineering*. 2008;42(2):64–66. <https://doi.org/10.1007/s10527-008-9019-y>

15. Efremov M.A., Filist S.A., Shatalova O.V., Startsev E.A., Shulga L.V. Method for Constructing Hybrid Fuzzy Models for Predicting the Occurrence and Complications of Arterial Hypertension in Drivers of Vehicles Taking into Account the Energy Characteristics of Bioactive Points. *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*. 2018;8(4):104–119. (In Russ.)

16. Kudryavtsev P.S., Shutkin A.N., Protasova V.V., Filist S.A. Structural Functional Model for Monitoring the Influence of Control Actions on Self-Organizing Systems State. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = The Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2015;(2):105–118. (In Russ.)

17. Filist S.A., Tomakova R.A., Yaa Z.D. Universal Network Models for Classification of Biomedical Data. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of Southwest State University*. 2012;(4):44–50. (In Russ.)

18. Petrunina E.V., Shatalova O.V., Protasova Z.U., Rybochkin A.F., Serebrovsky V.V. Prediction of Coronary Risk Using a Multichannel System with Redundant Decisions and Associative Choice. *Biomedical Engineering*. 2020;54(2):140–144. <https://doi.org/10.1007/s10527-020-09991-5>

19. Kobyakova O.S., Starovoytova E.A., Tolmachev I.V., et al. Contribution of Combined Risk Factors into Development of Chronic Non-Communicable Diseases. *Sotsial'nye aspekty*

zdorov'ya naseleniya = Social aspects of Population Health. 2020;(66):1. (In Russ.)
<https://doi.org/10.21045/2071-5021-2020-66-5-1>

20. Korenevskiy N.A., Filist S.A., Shatalova O.V., Kassim K.D.A., Rudenko V.V. Diagnostic Systems Based on Analysis of Current-Voltage Characteristics of Bioactive Points. *Biotekhnosfera = Biotechnosphere*. 2013;(5):33–38. (In Russ.)

21. Volkov I.I., Emel'yanov S.G., Filist S.A. Complicated Objects Classification Method Based on Analysis of Structural Functions of Slow Waves. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Journal Biomedical Radioelectronics*. 2012;4:6–12. (In Russ.)

22. Trifonov A.A., Petrunina E.V., Filist S.A., Kuzmin A.A., Zhilin V.V. Biotechnical System with Virtual Reality in Rehabilitation Complexes with Artificial Feedback. *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):49–66. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Петрунина Елена Валерьевна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой СМАРТ-технологий, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: isu@mospolytech.ru, ORCID: 0000-0003-3661-0778

Elena V. Petrunina, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of SMART Technologies, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, e-mail: isu@mospolytech.ru, ORCID 0000-0003-3661-0778

Шаталова Ольга Владимировна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: shatolg@mail.ru, Researcher ID: C-3687-2015, ORCID: 0000-0002-0901-9272

Olga V. Shatalova, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: shatolg@mail.ru, Researcher ID: C-3687-2015, ORCID: 0000-0002-0901-9272

Алавси Хайдер Али Хуссейн, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: book.hp.2015@gmail.com, ORCID: 0009-0007-5635-2493

Hayder Ali H. Alawsi, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: book.hp.2015@gmail.com, ORCID: 0009-0007-5635-2493

Песок Валерия Вячеславовна, аспирант
кафедры биомедицинской инженерии,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: lera.pesok@mail.ru,
ORCID: 0009-0006-9843-3809

Valeriya V. Pesok, Post-Graduate Student
of the Department of Biomedical Engineering,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: lera.pesok@mail.ru,
ORCID: 0009-0006-9843-3809

Кузьмин Александр Алексеевич, кандидат
технических наук, доцент, доцент кафедры
биомедицинской инженерии, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: Ku3bmin@gmail.com,
Researcher ID: F-8405-2013,
ORCID: 0000-0001-7980-0673

Alexander A. Kuzmin, Candidate of Sciences
(Engineering), Associate Professor, Associate
Professor of the Department of Biomedical
Engineering, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: Ku3bmin@gmail.com,
Researcher ID: F-8405-2013,
ORCID: 0000-0001-7980-0673

Шульга Леонид Васильевич, доктор
медицинских наук, профессор, профессор
кафедры охраны труда и окружающей среды,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: otios@mail.ru

Leonid V. Shulga, Doctor of Sciences (Medical),
Professor, Professor of the Department
of Occupational and Environmental Protection,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: otios@mail.ru,

Метод и нечеткие модели оценки функциональных состояний оперативной памяти

А. Ю. Рыбаков¹, С. Н. Родионова¹✉, К. В. Разумова¹,
Н. А. Милостная¹, Н. Л. Коржук²

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

² Тульский государственный университет
пр-т им. Ленина, д. 92, г. Тула 300012, Российская Федерация,

✉ e-mail: knsofia@mail.ru

Резюме

Цель исследования – повышение качества оценки функциональных состояний оперативной памяти путем разработки метода синтеза нечетких решающих правил.

Методы. Для контроля состояния различных блоков оперативной памяти выбран набор методик: оценка времени реакции; поиск сигнала в шуме; «опознание»; полное воспроизведение; определение отсутствующей цифры; объем памяти. Для синтеза решающих правил дополнительно использовались методики оценки таких свойств внимания, как переключаемость, концентрированность и устойчивость, для реализации которых применен прибор контроля свойств функции внимания и памяти. Для выбора адекватного математического аппарата исследований проведен разведочный анализ структуры обрабатываемых данных, по которому установлено, что выбранные классы состояний оперативной памяти имеют нечеткую природу с неопределенными границами их пересечений. С учетом этого в качестве математического аппарата исследований выбрана методология синтеза гибридных нечетких решающих правил, которая была модифицирована путем разработки нового метода нечеткой оценки функционального состояния оперативной памяти по характеристикам её свойств.

Результаты. В ходе проведенных исследований синтезированы модели для оценки таких характеристик функционального состояния, как уровни утомления, психоэмоционального напряжения и функционального состояния оперативной памяти по методике полного воспроизведения. Полученные модели могут быть использованы для синтеза решающих правил прогнозирования, ранней и дифференциальной диагностики функционального состояния, оценки качества работы оператора человеко-машинных систем и состояния здоровья оперативной памяти.

Заключение. В работе предложен метод синтеза нечетких решающих правил для оценки функционального состояния оперативной памяти по характеристикам её свойств с использованием методик, полученных по результатам микроструктурного анализа. Получены нечеткие решающие правила для оценки уровня утомления, психоэмоционального напряжения и функционального состояния оперативной памяти по методике полного воспроизведения. В ходе экспертного оценивания и математического моделирования показано, что уверенность в правильной оценке уровня функционального состояния превышает величину 0,95.

Ключевые слова: оперативная память; функциональное состояние; утомление; психоэмоциональное напряжение; 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: 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>

Поступила в редакцию 17.04.2024

Подписана в печать 15.05.2024

Опубликована 28.06.2024

The method and fuzzy models for evaluating the functional states of RAM

Anton Y. Rybakov¹, Sofia N. Rodionova¹ ✉, Ksenia V. Razumova¹,
Natalia A. Milostnaya¹, Nikolay L. Korzhuk¹

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

² Tula State University
92 Lenin Ave., Tula 300012, Russian Federation

✉ e-mail: knsofia@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to improve the quality of assessment of functional states of working memory by developing a method for synthesizing fuzzy decision rules.

Methods. To monitor the state of various RAM blocks, a set of techniques was selected: reaction time assessment; searching for a signal in noise; "identification"; full reproduction; identification of missing digits; Memory. To synthesize decision rules, additional methods were used to assess such properties of attention as switchability, concentration and stability, for the implementation of which a device for monitoring the properties of the attention and memory function was used. To select an adequate mathematical research apparatus, an exploratory analysis of the structure of the processed data was carried out, according to which it was established that the selected classes of RAM states are of a fuzzy nature with uncertain boundaries of their intersections. Taking this into account, the methodology for the synthesis of hybrid fuzzy decision rules was chosen as a mathematical research tool, which was modified by developing a new method for fuzzy assessment of the functional state of RAM based on the characteristics of its properties.

Results. In the course of the research, models were synthesized to assess such characteristics of the functional state as levels of fatigue, psycho-emotional stress and the functional state of RAM using the full reproduction method. The resulting models can be used to synthesize decision rules for forecasting, early and differential diagnostics of the functional state, assessing the quality of work of the operator of human-machine systems and the health status of RAM.

Conclusion. The paper proposes a method for synthesizing fuzzy decision rules for assessing the functional state of RAM based on the characteristics of its properties using techniques obtained from the results of microstructural analysis. Fuzzy decision rules were obtained for assessing the level of fatigue, psycho-emotional stress and the functional state of RAM using the full reproduction method. During expert assessment and mathematical modeling, it was shown that confidence in the correct assessment of the level of functional state exceeds 0,95.

Keywords: RAM; functional state; fatigue; psycho-emotional stress; fuzzy decisive rules.

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

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

For citation: Rybakov A.Y., Rodionova S.N., Razumova K.V., Milostnaya N.A., Korzhuk N.L. The method and fuzzy models for evaluating the functional states of RAM. *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(2):106–125. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-106-125>

Received 17.04.2024

Accepted 15.05.2024

Published 28.06.2024

Введение

Значительное место среди психических заболеваний занимают нарушения когнитивных функций, отвечающих за коммуникативный контакт человека с людьми и окружающей средой. Кроме того, как в повседневной жизни, так и в производственной сфере важную роль играет и функциональное состояние этих функций. В психологической науке к когнитивным функциям относят внимание, память, мышление, осознанную речь и др. [1, с. 9; 2, с. 91; 3, с. 93; 4, с. 154; 5, с. 295; 6, с. 85; 7, с. 22; 8, с. 85].

Существует несколько различных определений функционального состояния (ФС). В данной работе под ФС будем понимать текущую способность системы (конкретно – оперативной памяти), качественно выполнять присущие ей функции [9, с. 57–63].

Целью работы является оценка и контроль функциональных состояний (ФС) человека, его систем и органов, включая оперативную память. Данные показатели важны в двух основных аспектах – оценка эффективности деятельности в процессе выполнения профессиональных задач и оценка здоровья

человека, подвергающегося воздействию психического перенапряжения, монотонии, утомления, являющихся разновидностями ФС. Анализ роли оценки ФС организма человека в целом и его когнитивной функции памяти позволяет сделать вывод о важности показателей, характеризующих функциональное состояние исследуемых структур организма при проектировании средств управления сложными объектами, при обосновании эргономических и экологических решений по рабочим местам, при разработке адаптивных автоматизированных систем, для оптимизации процессов управления уровнем психической нагрузки и т. д. [10, с. 112; 11, с. 147; 12, с. 59; 13, с. 76]. Исследователи, занимающиеся оценкой ФС человека, его систем и органов, отмечают, что, несмотря на огромное количество работ в данном направлении, проблема ФС остается далека от своего решения [9, с. 58–72; 10, с. 112; 14, с. 254–290]. В работах [9, с. 48–52; 10, с. 112; 14, с. 254–302] приводится описание различных методов и средств, позволяющих получать количественные оценки, характеризующие ФС организма человека и его

систем. Для количественных оценок состояния памяти и её составляющих также разработано достаточно большое количество тестов [15, с. 43–53; 16, 86–87; 17, с. 28]. В наших исследованиях для тестирования состояния оперативной памяти был выбран прибор контроля свойств функции внимания и памяти (ПВП), хорошо зарекомендовавший себя при оценке состояний когнитивной функции внимания с расчетом количественных характеристик ФС и таких его составляющих, как оперативный покой, утомление и психоэмоциональное напряжение [6, с. 89; 14, с. 254–302; 16, с. 88; 17, с. 28].

Выбор математического аппарата исследований сопровождался активным использованием методов разведочного анализа, в ходе которого было установлено, что задачи оценки ФС и его составляющих решаются в условиях нечеткой структуры данных с неопределенными границами пересечений исследуемых классов функциональных состояний. В таких условиях в работах [10, с. 112; 18, с. 246–290] рекомендуется использовать методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), разработанную на кафедре биомедицинской инженерии Юго-Западного государственного университета, которая хорошо зарекомендовала себя при решении задач оценки ФС и его составляющих по показателям внимания, энергетического разбаланса биологически активных точек, по тестам личной и ситуативной тревожности и др.

Материалы и методы

В работе [15, с. 56] для контроля состояния блоков оперативной памяти предлагается использовать методики поиска сигнала в шуме (ПСШ), опознания (ОП), полного воспроизведения (ПВВ), определения отсутствующей цифры (ООЦ) и оценки объема памяти (ОБП). В этой же работе приведено подробное описание этих методик и условий их применения.

Для реализации этих методик на кафедре БМИ ЮЗГУ был разработан прибор контроля свойств функции внимания и памяти (ПВП) на базе планшетного компьютера с сенсорным экраном и программой распознавания словесных реакций испытуемого с оценкой правильности этих реакций. Этот прибор позволяет реализовывать все перечисленные методики оценки блоков оперативной памяти и такие свойства внимания, как концентрированность, объем, селективность, переключаемость, распределяемость и устойчивость [6, с. 89, 14, с. 254–270; 16, с. 88; 17, с. 28]. Дополнительное исследование свойств внимания при оценке состояния когнитивной функции памяти связано с тем, что показатели, характеризующие состояние внимания, позволяют учитывать совместное проявление этих двух когнитивных функций, не дифференцируя их проявления. Кроме того, этот прибор позволяет производить количественную оценку таких составляющих ФС, как оперативный покой, утомление и психоэмоциональное напряжение.

Для получения нечетких решающих правил классификации функциональных состояний по показателям, характеризующим состояние оперативной памяти S_j ($j = 1$ для методики оценки ВР, $j = 2$ для ПСШ, $j = 3$ для ОП, $j = 4$ для ПВВ, $j = 5$ для ООЦ, $j = 6$ для ОБП) на первом этапе исследований формировались обучающие выборки.

Для формирования группы людей класса нормы в смысле отсутствия нарушений когнитивной функции памяти рекомендуется использовать хорошо зарекомендовавшие себя эталонные тесты со шкалами T_i (i – номер теста в батарее тестов), ориентируясь на те свойства оперативной памяти, которые подвержены большей нагрузке от участия в конкретной операторской деятельности. В данном исследовании в качестве эталонных тестов T_i были выбраны показатели, характеризующие когнитивную функцию внимания, вычисляемые с помощью прибора ПВП.

В условиях выбранной нечеткой парадигмы для выбора формы и параметров функций принадлежности с базовой переменной T_i привлекаются эксперты, прошедшие подготовку по синтезу гибридных нечетких решающих правил с использованием метода Дельфы, которые необходимую смысловую информацию получают из профессиональной литературы, собственного опыта, и по возможности организуя модельные эксперименты. Количественный и качественный состав экспертной группы определяется с учетом требований квалитметрии и рекомендаций МСГНРП.

На основе информации о свойствах измерительных шкал T_i и их диагностических возможностей каждый из экспертов независимо друг от друга отвечает на следующие вопросы: для каких диапазонов измерительных шкал T_i и с какой уверенностью следует говорить о том, что оперативная память обследуемых находится в норме; для каких диапазонов измерительных шкал T_i и с какой уверенностью можно считать, что уверенность нахождения оперативной памяти в состоянии нормы практически равна нулю или принимает минимальное, но неизменное значение, определяемое существом решаемой задачи; какую форму имеют линии связи между соответствующими минимальными и максимальными уровнями уверенности.

Ответы на эти вопросы позволяют строить графики соответствующих функций принадлежности $\mu_H(T_i)$, которые уточняются под руководством инженера по знаниям по методу Дельфы. Применительно к оценке ФС речь идет о построении функций принадлежности к классу *нормальное функциональное состояние* $\mu_{\text{ФН}}(T_i)$. Аналогично могут быть построены функции принадлежности к классам *отклонение от номинального функционального состояния, активация, психоэмоциональное напряжение, утомление и др.*

При переходе от оценки состояния ОП по эталонным шкалам к шкалам S_j могут решаться следующие задачи:

– определение функции принадлежности $\mu_{\text{ФН}}(S_j)$ к лингвистической

переменной «нормальное функциональное состояние ОП» для шкал S_j ;

– синтез нечеткой модели оценки уровня соответствия классу нормальное функциональное состояние ОП путем агрегации функций принадлежности $\mu_{\Phi H}(S_j)$:

$$YSNF = Ag_{\Phi H_j} [\mu_{\Phi H}(S_j)], \quad (1)$$

где $Ag_{\Phi H_j}$ – агрегатор функций принадлежности $\mu_{\Phi H}(S_j)$;

– определение функций принадлежности к лингвистическим переменным, определяющим уровень функционального состояния составляющих характеризующих ОП важных для решения исследуемых классов задач, например, уровня психоэмоционального напряжения $\mu_{YP}(S_j)$, умственного утомления $\mu_{YU}(S_j)$ и т. д. для шкал S_j ;

– синтез нечетких моделей оценки уровня функционального состояния важных для решения исследуемых классов задач путем агрегации соответствующих функций принадлежности, например, для оценки уровня психоэмоционального напряжения

$$YP = Ag_{YP_j} [\mu_{YP}(S_j)], \quad (2)$$

для оценки уровня утомления

$$YU = Ag_{YU_j} [\mu_{YU}(S_j)]. \quad (3)$$

Для решения первой задачи (определение параметров функции принадлежности $\mu_{\Phi H}(S_j)$) предлагается следующий алгоритм действий.

Формируется группа испытуемых, которые не имеют нарушений когнитивной функции памяти, но должны находиться в различных функциональных состояниях от функционального покоя до психоэмоционального перенапряжения и умственного переутомления.

Причем возможен вариант, когда люди из состояния покоя различными нагрузочными тестами переводятся в заданные ФС, например, в качестве нагрузочных тестов можно использовать интенсивное и длительное выполнение методик, реализуемых ПВП. Для увеличения эффекта моделирования психоэмоционального напряжения (ПЭН) выбранная методика модифицируется следующим образом. Испытуемому сообщается, что успешное ее выполнение очень важно в его жизнедеятельности и что на экране монитора будет индцироваться то, чего обязательно нужно достичь и каков его результат.

При этом программа работает так, что каков бы ни был результат работы испытуемого, на экране он видит, что он не достигает заданной цели, создавая предпосылки для возникновения ПЭН. Уровень ПЭН и утомления при этом легко контролируется по параметрам переключаемости, концентрированности и устойчивости с использованием моделей, описанных в работах [14, с. 258–270; 16, с. 88; 17, с. 28]. В этих работах была получена функция принадлежности к классу нормальное функциональное состояние $\mu_{\Phi H}(Z)$:

$$\mu_{\Phi H}(Z) = \begin{cases} 1, & \text{если } z \leq 20, \\ 1 - 0,00031(z - 20)^2, & \text{если } 20 < z < 60, \\ 0,00031(z - 100)^2, & \text{если } 60 \leq z < 100, \\ 0, & \text{если } z \geq 100, \end{cases} \quad (4)$$

где $Z = |Y1| + |Y2|$; $Y1 = (ПВ - ПВ_0) + (KB - KB_0)$; $Y2 = UB - UB_0$; $ПВ$, $ПВ_0$ – текущая переключаемость внимания и переключаемость внимания, измеренная в состоянии спокойного бодрствования; KB , KB_0 – соответствующие показатели концентрирования внимания; UB , UB_0 – соответствующие показатели устойчивости внимания.

У людей, находящихся в различных ФС, вычисляются значения $\mu_{\Phi H}(Z)$ (модель 4) и измеряются значения S_j , т. е. каждый обследуемый описывается парой $\{\mu_{\Phi H}(Z); S_j\}$. По этой паре определение

параметров функции принадлежности $\mu_{\Phi H}(S_j)$ предлагается производить в графической форме с использованием в качестве оси абсцисс шкалы S_j , которая разбивается на интервалы ΔS_j , определяемые аналогично тому, как это делается при построении гистограмм.

Для обследуемых с номером q , попадающих в интервал с номером k по вычисленным значениям $\mu_{\Phi H}(Z_q)$, определяются средние значения функций принадлежности для лингвистической переменной *нормальное функциональное состояние*:

$$\overline{\mu}_{jk} = \frac{1}{N_k} \sum_{q=1}^{N_k} \mu_{\Phi H}(Z_q). \quad (5)$$

Далее строится график ступенчатой функции, высота «столбика» которой для интервала k равна $\overline{\mu}_{jk}$, пример такого графика приведен ниже (рис. 1).

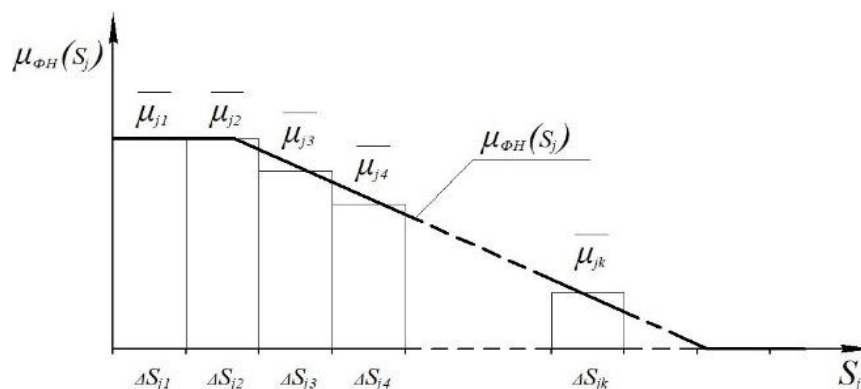


Рис. 1. Пример графика усредненных значений для лингвистической переменной «нормальное функциональное состояние»

Fig. 1. An example of a graph of averaged values for the linguistic variable "normal functional state"

Полученный график ступенчатой функции служит основой для

построения искомой функции принадлежности $\mu_{\Phi H}(S_j)$ при использовании

тех же рекомендаций, которые в рамках МСГНРП используют для построения функций принадлежности по признаковым и дистальным гистограммам.

На рисунке 1 жирной линией показан вариант функции принадлежности $\mu_{\text{ФН}}(S_j)$, построенной экспертами с их ориентацией на форму ступенчатой функции $\overline{\mu_{jk}}$.

Можно воспользоваться и другим формальным подходом – построить регрессионную модель по точкам с координатами $\{S_{jk}^c, \overline{\mu_{jk}}\}$:

$$S_{jk}^c = \frac{(S_{jk}^e - S_{jk}^h)}{2}, \quad (6)$$

где S_{jk}^e, S_{jk}^h – верхняя и нижняя границы k -го интервала ($k = 1, \dots, K$).

Функцию принадлежности $\mu_{\text{ФО}}(S_i)$ к лингвистической переменной «отклонение функционального состояния исследуемой характеристики S_j , определяющей состояние ОП от нормы» удобно определять как обратную по отношению к функции принадлежности $\mu_{\text{ФН}}(S_j)$:

$$\mu_{\text{ФО}}(S_i) = \mu_{\text{ФН}}^{\max}(S_i) - \mu_{\text{ФН}}(S_i), \quad (7)$$

где $\mu_{\text{ФН}}^{\max}(S_i)$ – максимальное значение $\mu_{\text{ФН}}(S_j)$ (в пределе единица).

Вторую задачу синтеза нечеткой модели оценки уровня соответствия классу *нормальное функциональное состояние (НФС) ОП* с использованием модели (1) будем рассматривать как синтез модели

оценки уверенности в классе НФС по набору шкал, характеризующих состояние ОП.

Исходными данными для решения этой задачи являются функции принадлежности $\mu_{\text{ФН}}(S_j)$, полученные при решении первой задачи. При этом показатели S_j по отношению к решаемой задаче следует рассматривать как многомерное пространство признаков, для которого определяется состав информативных признаков.

С учетом нечеткой природы используемых данных для оценки информативной ценности измерительных шкал S_j рекомендуется выбрать метод, описанный в работе [19, с. 90].

Полученные оценки информативности служат основанием для включения показателей S_j в модель (1). Функции агрегации модели (1) определяются экспертами в соответствии с рекомендациями МСГНРП по следующим правилам.

Если добавление функций принадлежности $\mu_{\text{ФН}}(S_j)$ для отобранных информативных показателей S_j увеличивает значение оценки уровня соответствия классу *нормальное функциональное состояние ОП*, то выбирается агрегатор типа:

$$YSNF(j+1) = YSNF(j) + \mu_{\text{ФН}}(S_{j+1})[1 - YSNF(j)]. \quad (8)$$

Если эксперты считают, что оценка уровня соответствия классу *нормальное функциональное состояние ОП* должна осуществляться по показателю с

максимальным значением $\mu_{\Phi H}(S_j)$, т. е.

по той характеристике оперативной памяти, которая на момент регистрации имеет наилучшее функциональное состояние, то выбирается агрегатор типа

$$YSNF = \max_j [\mu_{\Phi H}(S_j)]. \quad (9)$$

Если оценка уровня соответствия классу *нормальное функциональное состояние ОП* осуществляется по той характеристике оперативной памяти, которая на момент регистрации имеет наихудшее функциональное состояние, то выбирается агрегатор типа

$$YSNF = \min_j [\mu_{\Phi H}(S_j)]. \quad (10)$$

Если эксперты считают, что характеристики оперативной памяти, включенные в интегральную оценку уровня соответствия классу *нормальное функциональное состояние ОП*, вносят различный «вклад» в показатель $YSNF$, то рекомендуется использовать агрегатор типа

$$YSNF = \frac{\sum_{j=1}^N \alpha_j \cdot \mu_{\Phi H}(S_j)}{\sum_{j=1}^N \alpha_j}, \quad (11)$$

где α_j – весовые коэффициенты, определяемые экспертами с учетом информативности показателей S_j и (или) типов решаемых задач.

Оценку уверенности в том, что испытуемый находится в классе *отклонение функционального состояния от нормы* $YSOF$, удобно определять как обратную по отношению к $YSNF$ функцию:

$$YSOF = YSNF_{\max} - YSNF. \quad (12)$$

где $YSNF_{\max}$ – максимальное значение $YSNF$ (в пределе единица).

Если у экспертов возникают сложности по выбору параметров функций принадлежности и функций агрегации, то следует сформировать обучающие выборки из обследуемых, находящихся в искомым функциональных состояниях (как минимум в двух классах НФС и отклонение ФС от нормы (ОФС)). С использованием эталонных тестов со шкалами T_i обучающие выборки разделяются на таблицы экспериментальных данных (ТЭД) по выбранным классам функциональных состояний, например, ТЭД для класса $\omega_{\text{НФ}}$ – нормальное ФС и ТЭД для класса $\omega_{\text{ОФ}}$ – ФС имеет отклонение от нормы.

В полученных ТЭД показатели S_j рассматриваются как информативные признаки в классической постановке задач теории распознавания образов.

По ТЭД синтез решающих правил отнесения объектов к классам $\omega_{\text{НФ}}$ и $\omega_{\text{ОФ}}$ может осуществляться как классическими методами теории распознавания образов, включая искусственные нейронные сети, так и с использованием МСГНРП. В случае применения МСГНРП на первом этапе синтеза рекомендуется использовать разведочный анализ, ориентированный на нечеткое описание данных, позволяющий не только произвести анализ структуры данных, но и сформировать рекомендации по выбору параметров функций

принадлежности и видов функций агрегации [10, с. 114; 14, с. 260–264; 20, с. 18].

При решении третьей задачи по определению функций принадлежности к лингвистическим переменным, определяющим уровень функционального состояния составляющих, характеризующих ОП на первом этапе, эксперты выбирают соответствующие эталонные тесты со шкалами T_i .

В специальной литературе можно найти достаточный арсенал тестов по диагностике функциональных состояний.

Четвертая задача синтеза нечетких моделей оценки уровня функционального состояния важных для решения исследуемых классов задач осуществляется аналогично решению второй задачи путем агрегации соответствующих функций принадлежности, но в качестве исходных данных используются функции принадлежности, определяющие уровни психоэмоционального напряжения, умственного утомления и т. д. для шкал S_j . Функции агрегации выбираются по тем же правилам, что и для моделей (8) – (11), или решается классическая задача распознавания образов в пространстве признаков S_j по таблицам экспериментальных данных размеченных по исследуемым классам ФС с помощью эталонных тестов.

Результаты и их обсуждение

В данной работе рассмотрен вариант оценки таких функциональных состояний, как ПЭН и утомление определяемых прибором ПВП по показателям внимания с использованием моделей, описанных в работах [14, с. 268–270; 16, с. 89; 17, с. 29].

В этих работах тестовая (эталонная) оценка уровня ПЭН определяется с использованием нечеткой модели вида

$$FUP = \min[UP(Y1), UP(Y2)] \quad (13)$$

где FUP – функция уровня ПЭН; Y_1 и Y_2 – функции, определяемые так же, как и для модели (4);

$$UP(Y1) = \begin{cases} 0, & \text{если } Y1 < 20, \\ 0,00448(Y1 + 20)^2, & \text{если } -20 \leq Y1 < 10, \\ 0,8 - 0,0044(Y1 - 40)^2, & \text{если } 10 \leq Y1 < 40, \\ 0,8 < & \text{если } Y1 \geq 20; \end{cases}$$

$$UP(Y2) = \begin{cases} 0, & \text{если } Y2 < -20, \\ 0,00448(Y2 + 20)^2, & \text{если } -20 \leq Y2 < 0, \\ 0,8 - 0,001(Y2 - 20)^2, & \text{если } 0 \leq Y2 < 20, \\ 0,8 < & \text{если } Y2 \geq 20. \end{cases}$$

Тестовая функция уровня утомления FUU определяется с использованием нечеткой модели вида

$$FUU = \max \{ \min[UU_1(Y1), UU_1(Y2)], \min[UU_2(Y1), UU_2(Y2)] \}, \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
 UP_1(Y1) &= \begin{cases} 0,8, & \text{если } Y1 < -60, \\ 0,8 - 0,0044(Y1 + 60)^2, & \text{если } -60 \leq Y1 < -30, \\ 0,0044(Y1 + 30)^2, & \text{если } -30 \leq Y1 < 0, \\ 0, & \text{если } Y1 \geq 0; \end{cases} \\
 UU_2(Y1) &= \begin{cases} 0, & \text{если } Y1 < -10, \\ 0,00044(Y1 + 10)^2, & \text{если } -10 \leq Y1 < 20, \\ 0,8 - 0,00044(Y1 - 50)^2, & \text{если } 20 \leq Y1 < 50, \\ 0,8, & \text{если } Y1 \geq 50; \end{cases} \\
 UP(Y1) &= \begin{cases} 0,8, & \text{если } Y2 < -80, \\ 0,8 - 0,00025(Y2 + 80)^2, & \text{если } -80 \leq Y1 < -40, \\ 0,00025(Y2)^2, & \text{если } -40 \leq Y1 < 0, \\ 0, & \text{если } Y2 \geq 0. \end{cases}
 \end{aligned}$$

Переход от тестовых шкал FUP и FUU к функциям принадлежности, высокий уровень ПЭН $\mu_{WP}(S_j)$ и высокий уровень утомления $\mu_{WU}(S_j)$ с базовыми переменными по шкалам S_j осуществляются в соответствии с первым вариантом предлагаемого способа аналогично решению задачи определения функции принадлежности $\mu_{ФН}(S_j)$ к лингвистической переменной *нормальное функциональное состояние ОП*.

На первом этапе решения этой задачи шкалы S_j разбивается на интервалы ΔS_j , например по правилам, принятым при построении гистограмм.

Далее формируется группа испытуемых, которые не имеют нарушений когнитивной функции памяти, но должны иметь различные уровни ПЭН или утомления, которые могут моделироваться

интенсивным и длительным выполнением методик, реализуемых ПВП, так как это описано для определения $\mu_{ФН}(S_j)$. У людей, имеющих различный уровень ПЭН с использованием модели 13, определяются их показатели FUP и параллельно измеряются значения по выбранным шкалам S_j , т. е. каждый обследуемый описывается парой $\{FUP, S_j\}$. Аналогично для состояния утомления формируются пары $\{FUU, S_j\}$.

Далее аналогично $\mu_{ФН}(S_j)$ строятся графики ступенчатых функций средних значений FUP и FUU для каждого интервала ΔS_j каждого из выбранных показателей S_j , по которым эксперты строят графики соответствующих функций принадлежности.

Рассмотрим пример графика для такого ФС, как утомление (рис. 2).

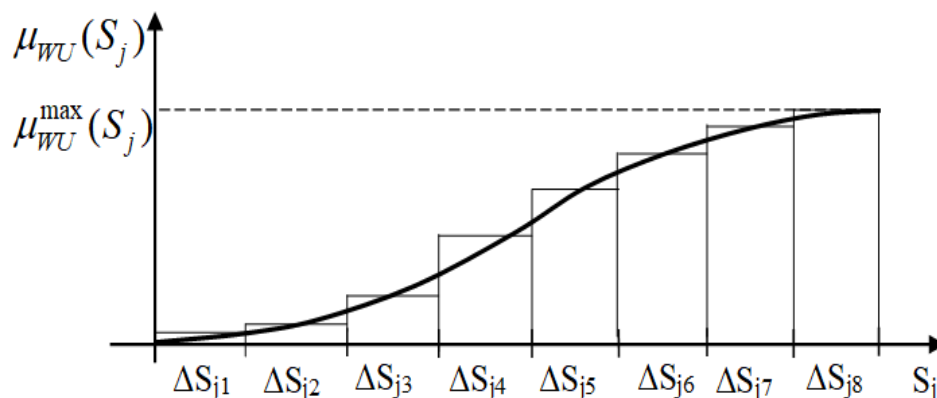


Рис. 2. Пример графика усредненных значений и функции принадлежности к лингвистической переменной высокий уровень утомления ($\mu_{WU}(S_j)$)

Fig. 2. An example of a graph of averaged values and the function of belonging to the linguistic variable high fatigue level ($\mu_{WU}(S_j)$)

Функции принадлежности к лингвистическим переменным *отсутствие утомления* и *ПЭН* определяются как обратная по отношению к ($\mu_{WP}(S_j)$) и ($\mu_{WU}(S_j)$):

$$\mu_{NU}(S_j) = \mu_{WU}^{\max}(S_j) - \mu_{WU}(S_j), \quad (15)$$

$$\mu_{NP}(S_i) = \mu_{WP}^{\max}(S_i) - \mu_{WP}(S_i). \quad (16)$$

Оценивая ФС оперативной памяти, в целом принималось во внимание то, что по данным работы [15, с. 40] методика ПВВ тестирует работу всех основных блоков ОП. С учетом этого на экспертном уровне было принято решение показатель, характеризующий ФС ОП, определять по методике ПВВ. Для получения модели оценки ФС эксперты при построении графика функции принадлежности $\mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ})$ лингвистической

переменной «нормальное функциональное состояние оперативной памяти» (НФС ОП) определяли: максимальное значение и левую координату максимального значения $\mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ})$; минимальное значение и правую координату минимального значения $\mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ})$; форму $\mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ})$ переходного участка между максимальным и минимальным значением. При выборе минимального значения эксперты исходили из того, что у человека, способного выполнять тестовое задание, не может отсутствовать ФС.

Рассмотрим результаты опроса экспертов (табл. 1).

График ФП $\mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ})$, построенный по усредненным данным таблицы 1, приведен ниже (рис. 3).

Таблица 1. Базовые параметры функции принадлежности $\mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ})$ **Table 1.** Basic parameters of the accessory function $\mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ})$

Эксперты	Параметр				
	max ФП	левая граница	min ФП	правая граница	форма кривой
1	1,0	900	0,05	1900	КВ
2	1,0	1200	0,1	2000	ЛГ
3	0,9	1200	0,15	1700	ЛГ
4	1,0	1000	0,1	1700	КВ
5	1,0	950	0,05	1500	КВ
6	1,0	1000	0,1	1800	КВ
7	0,9	900	0,1	2000	ЭК
Среднее	1,0	1000	0,1	1800	КВ

Примечание: Введены следующие обозначения: ФП – функция принадлежности; ЛН – линейная; КВ – квадратичная; ЛГ – логарифмическая; ЭК – экспоненциальная.

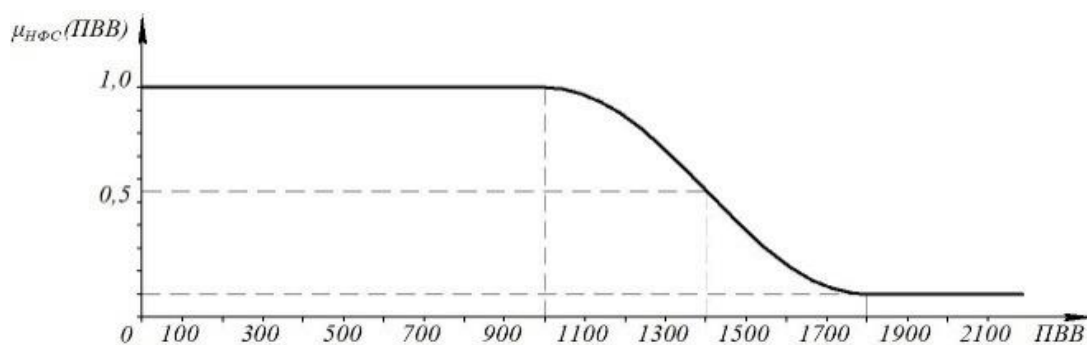
**Рис. 3.** График ФП $\mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ})$ **Fig. 3.** Graph of the membership function $\mu_{\text{НФС}}(\text{FP})$

График функции (рис. 3) описывается выражением

$$\mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ}) = \begin{cases} 1, & \text{если } \text{ПВВ} < 1000, \\ 1 - 0,0000028(\text{ПВВ} - 1000)^2, & \text{если } 1000 \leq \text{ПВВ} < 1400, \\ 1 + 0,0000028(\text{ПВВ} - 1800)^2, & \text{если } 1400 \leq \text{ПВВ} < 1800, \\ 0, & \text{если } \text{ПВВ} \geq 1800. \end{cases} \quad (17)$$

С учетом принятых допущений функциональное состояние ОП $FS_{\text{ОП}}$ количественно определяется рассчитанной величиной функции принадлежности $\mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ})$:

$$FS_{\text{ОП}} = \mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ}). \quad (18)$$

Экспертная оценка полученного решающего правила, проводимая по методике, описанной в работах [18, с. 198–214; 19, с. 83], показала уровень доверия

к модели (18) на уровне 0,96. В ходе математического моделирования, проводимого по исходным данным, сформированным экспертами, была получена уверенность на уровне 0,97, что является хорошим результатом для задач оценки ФС с нечетким представлением данных [21; 22; 23].

Выводы

В работе предложен метод синтеза нечетких решающих правил для оценки функционального состояния оперативной памяти по характеристикам её

свойств с использованием методик, полученных по результатам микроструктурного анализа. Получены нечеткие решающие правила для оценки таких характеристик функционального состояния, как уровни утомления, психоэмоционального напряжения и функционального состояния оперативной памяти в целом по методике полного воспроизведения. В ходе экспертного оценивания и математического моделирования было показано, что уверенность в правильной оценке уровня функционального состояния превышает величину 0,95.

Список литературы

1. 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>
2. Поиск ассоциации полиморфизма I/D гена ACE с самооценкой работоспособности, памяти и состоянием сердечно-сосудистой системы у представителей профессионального сообщества лидеров / А. В. Власов, Е. В. Богданенко, Л. П., Кузьмина, А. А. Ёлов // Медицина труда и промышленная экология. 2024. Т. 64, № 2. С. 91–98. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2024-64-2-91-98>
3. Особенности проявления соматических и когнитивных нарушений у лиц юношеского возраста, перенесших COVID-19 / Л. А. Варич, Я. И. Брюханов, А. В. Серый, А. В. Солодухин // Вестник психофизиологии. 2022. № 4. С. 92–99. <https://doi.org/10.34985/f0194-0574-8740-f>
4. Факторная структура функционального состояния у лиц юношеского возраста в период пандемии COVID-19 / А. В. Солодухин, А. В. Серый, Л. А. Варич, Я. И. Брюханов // Сибирский психологический журнал. 2023. № 89. С. 152–163. <https://doi.org/10.17223/17267080/89/9>
5. Анализ когнитивных функций и нейрофизиологических процессов при адаптации человека к условиям арктики / Е. П. Муртазина, И. И. Коробейникова, Л. В. Поскотина, 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. Метод синтеза математических моделей прогнозирования и ранней диагностики нарушений когнитивных функций / Н. А. Корневский, С. Н. Родионова, А. В. Поляков, Т. Н. Говорухина // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 4. С. 85–92. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.18.4.011>
7. Малкова А. А., Пустовалова А. Д., Борисова Е. А. Оценка когнитивных функций у пациентов с артериальной гипотонией // Пермский медицинский журнал. 2022. Т. 39, № 4. С. 19–25. <https://doi.org/10.17816/pmj39419%25>
8. Игнатова Ю. П., Макарова И. И., Страхов К. А. Когнитивные вызванные потенциалы: Р300 в нейрофизиологии и клинической практике // Крымский журнал экспериментальной и клинической медицины. 2022. Т. 12, № 4. С. 80–91. <https://doi.org/10.29039/2224-6444-2022-12-4-80-91>
9. Мурик С. Э. Оценка функционального состояния организма человека: в 2 ч. Иркутск: Издательство Иркутского государственного университета, 2013. Ч. 1. 159 с.
10. 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>
11. 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.
12. 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.
13. 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>
14. Корневский Н. А., Шуткин А. Н., Горбатенко С. А., Серебровский В. И. Оценка и управление состоянием здоровья обучающихся на основе гибридных интеллектуальных технологий: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2020. 472 с.
15. Зинченко В. П., Леонова А. Б., Стрелков Ю. К. Психометрика утомления. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. 109 с.
16. 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>

17. An expert system for assessment of the state of cognitive functions using a fuzzy hybrid knowledge base / N. A. Korenevskiy, S. N. Rodionova, V. V. Aksenov, N. L. Korzhuk // Biomedical Engineering. 2021. Vol. 55, N 4. P. 263–268

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. 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. № 3. С. 80–96. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-80-96>

20. Prediction of operators cognitive degradation and impairment using hybrid fuzzy modelling / N. A. Korenevskiy, Riad Taha Al-Kasasbeh, Fawaz Al-Shawawreh, Tareq Ahram, S. N. Rodionova, S. Mahdi, S. A. Filist, M. Namazov, A. Shaqadan, M. Ilyash // Theoretical Issues in Ergonomics Science. 2022. N 24(2). P. 1–26. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2022.2086645>

21. Булгакова О. С. Динамика некоторых свойств мышления и образной и слуховой видов памяти в фоне и после функциональной нагрузки // Мир науки. Педагогика и психология. 2023. Т. 11, № 6. С. 1–13.

22. Апробация методики оценки психофизиологического состояния оператора при виртуализации рабочего информационного пространства / И. В. Тарасова, М. С. Никитенко, О. А. Трубникова, И. Н. Кухарева, Д. С. Куприянова, А. С. Соснина, О. Л. Барбараш // Фундаментальная и клиническая медицина. 2021. Т. 6, № 2. С. 66–74. <https://doi.org/10.23946/2500-0764-2021-6-2-66-74>

23. Лисова Н. А., Черенева Е. А., Шилов С. Н. Взаимосвязь уровня нейрометаболизма со степенью когнитивного дефицита у пожилых людей // Психология. Психофизиология. 2022. Т. 15, № 4. С. 84–93.

References

1. Velichkovskii B.B. Cognitive effects of mental fatigue. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 14: Psikhologiya = Moscow University Psychology Bulletin. Series 14: Psychology*. 2019;(1):108–122. (In Russ.) <https://doi.org/10.11621/vsp.2019.01.108>

2. Vlasov A.V., Bogdanenko E.V., Kuz'mina L.P., Elov A.A. Search for an association of the I/D polymorphism of the ACE gene with self-assessment of performance, memory and the state of the cardiovascular system among representatives of the professional community of

leaders. *Medsina truda i promyshlennaya ehkologiya = Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2024;64(2):91–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2024-64-2-91-98>

3. Varich L.A., Bryukhanov Y.I., Seryi A.V., Solodukhin A.V. Features of the manifestation of somatic and cognitive disorders in adolescents who have had COVID-19. *Vestnik psikhofiziologii = Psychophysiology News*. 2022;(4):92–99. (In Russ.) <https://doi.org/10.34985/f0194-0574-8740-f>

4. Solodukhin A.V., Seryi A.V., Varich L.A., Bryukhanov Y.I. Factor of the functional state stream in young people during the COVID-19 pandemic. *Sibirskii psikhologicheskii zhurnal = Siberian Journal of Psychology*. 2023;(89):152–163. (In Russ.) <https://doi.org/10.17223/17267080/89/9>

5. Murtazina E.P., Korobeinikova I.I., Poskotinova L.V., Karatygin N.A., Pertsov S.S. Analysis of cognitive functions and neurophysiological processes during human adaptation to Arctic conditions. *Rossiiskii mediko-biologicheskii vestnik imeni akademika I. P. Pavlova = I. P. Pavlov Russian Medical Biological Herald*. 2023;31(2):293–304. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/PAVLOVJ109581>

6. Korenevskii N.A., Rodionova S.N., Polyakov A.V., Govorukhina T.N. Method for synthesizing mathematical models for forecasting and early diagnosis of cognitive impairment. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2019;18(4):85–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.18.4.011>

7. Malkova A.A., Pustovalova A.D., Borisova E.A. Assessment of cognitive functions in patients with arterial hypotension. *Permskii meditsinskii zhurnal = Perm Medical Journal*. 2022;39(4):19–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/pmj39419%25>

8. Ignatova Y.P., Makarova I.I., Strakhov K.A. Cognitive evoked potentials: P300 in neurophysiology and clinical practice. *Krymskii zhurnal ehksperimental'noi i klinicheskoi meditsiny = Crimean Journal of Experimental and Clinical Medicine*. 2022;12(4):80–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.29039/2224-6444-2022-12-4-80-91>

9. Murik S.E. Assessment of the functional state of the human body. Pt. 1. Irkutsk: Izdatel'stvo IGU; 2013. 159 p. (In Russ.)

10. Govorukhina T.N., Myasoedova M.A., Grigorov I.Y., Polyakov A.V. Mathematical models for prediction and early diagnosis of nervous system diseases provoked by the combined influence of diverse risk factors. *Sistemnyi Analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = Systems Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2019;18(2):110–116. (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.18.2.022>

11. Brumshtein Y.M., Molimonov D.A. Models, methods, technical means of risk management for the design, creation and operation of complex human-machine systems, taking into account the psychophysiological characteristics of human operators. *Prikaspiiskii*

zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Control and High Technologies. 2019;(3):143–162. (In Russ.)

12. Matel' V.A. Shishlyannikova O.A. Man-machine system and analysis, and the influence of environmental factors on the productivity and health of workers. *Rossiiskii ekonomicheskii vestnik = Russian Economic Bulletin*. 2023;6(2):58–63. (In Russ.)

13. Brumshtein Y.M. Molimonov D.A. Mathematical models and methods for solving problems of information support, management and assessment of the quality of work of operators in complex human-machine systems. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2019;(3):73–89. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2019-3-73-89>

14. Korenevsky N.A., Shutkin A.N., Gorbatenko S.A., Serebrovsky V.I. Assessment and management of the health status of students based on hybrid intelligent technologies. Staryi Oskol: TNT; 2020. 472 p.

15. Zinchenko V.P., Leonova A.B., Strelkov Y.K. Psychometrics of fatigue. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta; 1977. 109 p. (In Russ.)

16. Korenevskii N.A., Polyakov A.V., Rodionova S.N., Govorukhina T.N. Method for synthesizing mathematical models for forecasting and early diagnosis of cognitive impairment. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biotechnical Systems*. 2019;18(4):85–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.18.4.011>

17. Korenevskiy N.A., Rodionova S.N., Aksenov V.V., Korzhuk N.L. An expert system for assessment of the state of cognitive functions using a fuzzy hybrid knowledge base. *Biomedical engineering*. 2021;55(4):263–268.

18. Korenevskii N.A., Rodionova S.N., Khripina I.I. Methodology for the synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems. Staryi Oskol: TNT; 2019. 472 p. (In Russ.)

19. Korenevskii N.A., Aksenov V.V., Rodionova S.N., Gontarev S.N., Lazurina L.P., Safonov R.I. Method for a comprehensive assessment of the level of information content of classification features in conditions of a fuzzy data structure. *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*. 2022;(3):80–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-80-96>

20. Korenevskiy N.A., Riad Taha Al-Kasasbeh, Fawaz Al-Shawawreh, Tareq Ahram, Rodionova S.N., Mahdi Salman, Filist S.A., Namazov M., Shaqadan A., Ilyash M. Prediction of operators cognitive degradation and impairment using hybrid fuzzy modelling. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 2022;(24):1–26. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2022.2086645>

21. Bulgakova O.S. Dynamics of some properties of thinking and figurative and auditory types of memory in the background and after functional load. *Mir nauki. Pedagogika i psikhologiya = World of Science. Pedagogy and Psychology*. 2023;11(6):1–13. (In Russ.)

22. Tarasova I.V., Nikitenko M.S., Trubnikova O.A., Kukhareva I.N., Kupriyanova D.S., Sosnina A.S., Barbarash O. Approbation of a methodology for assessing the psychophysiological state of the operator during virtualization of the working information space. *Fundamental'naya i klinicheskaya meditsina = Fundamental and Clinical Medicine*. 2021;6(2):66–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.23946/2500-0764-2021-6-2-66-74>

23. Lisova N.A., Chereneva E.A., Shilov S.N. Relationship between the level of neurometabolism and the degree of cognitive deficit in older people. *Psikhologiya. Psikhofiziologiya = Psychology. Psychophysiology*. 2022;15(4):84–93. (In Russ.) <http://dspace.susu.ru/xmlui/handle/00001.74/51076>

Информация об авторах / Information about the Authors

Рыбаков Антон Юрьевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Anton Y. Rybakov, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

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, Scopus ID: 57195455825, WOS ID: Q-1060-2017

Sofia 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, Scopus ID: 57195455825, WOS ID: Q-1060-201

Разумова Ксения Викторовна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: myelectronworld@mail.ru, ORCID: 0009-0007-7942-8083

Ksenia V. Razumova, Candidate of Sciences (Engineering), Senior Lecturer of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: myelectronworld@mail.ru, ORCID: 0009-0007-7942-8083

Милостная Наталья Анатольевна, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nat_mil@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3779-9165, Scopus ID: 57191472450, WOS ID: O-3596-2015

Коржук Николай Львович, кандидат технических наук, доцент кафедры приборов и биотехнических систем, Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация, e-mail: nikolaikorzhuks@mail.ru, ORCID: 0009-0009-1738-8914, Scopus ID: 24802282500

Natalia A. Milostnaya, Doctor of Sciences (Engineering), Leading Researcher of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nat_mil@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3779-9165, Scopus ID: 57191472450, WOS ID: O-3596-2015

Nikolay L. Korzhuk, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Devices and Biotechnical Systems, Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: nikolaikorzhuks@mail.ru, ORCID: 0009-0009-1738-8914, Scopus ID: 24802282500

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-126-141>



УДК 004.89

Моделирование информативных признаков на основе амплитудно-фазовой частотной характеристики при проведении биоимпедансных исследований на биологическом объекте

Н. А. Корсунский¹, Д. К. Реутов¹, А. А. Малышев¹, Р. А. Томакова¹ ✉

¹ Юго-Западный государственный университет

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

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Резюме

Цель исследования заключается в разработке и апробации методики формирования информативных признаков с помощью дескрипторов для нейронных сетей, предназначенных для оценки медицинских рисков на основе анализа переходных процессов в биоматериале в живом организме (*in vivo*).

Методы. Исследования предполагают применение тестовых электрических воздействий на участки тела с необычной проводимостью для получения амплитудно-фазочастотной характеристики импеданса биоматериала, на который производилось указанное воздействие. В качестве ключевых параметров использовались координаты графика Коула данного биоматериала. Для формирования графика Коула применялось преобразование Карсона, основанное на данных переходного процесса, полученных с помощью четырехполюсника, где основным элементом является импеданс изучаемого биоматериала. Входными сигналами для четырехполюсника была последовательность синусоидальных импульсов.

Результаты. На основе системы сбора данных E20-10 производства ЗАО «L-Card» разработан программно-аппаратный комплекс для оцифровки переходных процессов в четырехполюсниках, элементом которых является импеданс биоматериала в анатомических областях с аномальной электропроводностью. Было разработано программное обеспечение на языке программирования Delphi для генерации тестовых сигналов и записи ответных реакций биоматериала на эти воздействия. Также была предложена теоретическая модель, объясняющая преобразование отсчетов переходной характеристики четырехполюсника с импедансом биоматериала к графику Коула данного биоматериала.

Заключение. Исследование подтверждает, что использование линейной модели импеданса биоматериала способствует формированию дескрипторов на основе амплитудно-фазочастотной характеристики, учитывающих его диссипативные свойства. Построение графика Коула с учетом этих диссипативных характеристик позволяет разрабатывать классификаторы медицинских рисков возникновения социально значимых заболеваний.

Ключевые слова: медицинский риск; четырехполюсник; биоимпеданс; программно-аппаратный комплекс; амплитудно-фазочастотная характеристика.

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

© Корсунский Н. А., Реутов Д. К., Малышев А. А., Томакова Р. А., 2024

Для цитирования: Модель информационного обеспечения регионального оператора по обращению с твердыми коммунальными отходами / Н. А. Корсунский, Д. К. Реутов, А. А. Малышев, Р. А. Томакова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 2. С. 126–141. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-126-141>

Поступила в редакцию 28.04.2024

Подписана в печать 20.05.2024

Опубликована 28.06.2024

Modeling of informative features based on the amplitude-phase frequency response during bioimpedance studies at a biological facility

Nikita A. Korsunskii¹, Dmitry K. Reutov¹, Anton A. Malyshev¹,
Rimma A. Tomakova¹ ✉

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

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Abstract

The purpose of research is to develop and test a technique for forming informative features using descriptors for neural networks designed to assess medical risks based on the analysis of transient processes in biomaterial in a living organism (*in vivo*).

Methods. Studies suggest the use of test electrical effects on areas of the body with unusual conductivity to obtain the amplitude-phase-frequency characteristic of the impedance of the biomaterial on which the specified effect was performed. The coordinates of the Cole graph of this biomaterial were used as key parameters. To form the Cole graph, the Carson transform was used, based on transient data obtained using a four-terminal, where the main element is the impedance of the studied biomaterial. The input signals for the four-terminal were a sequence of sinusoidal pulses.

Results. Based on the E20-10 data collection system manufactured by L-Card CJSC, a software and hardware complex has been developed for digitizing transient processes in four-terminal circuits, the element of which is the impedance of biomaterial in anatomical areas with abnormal electrical conductivity. Software in the Delphi programming language was developed to generate test signals and record biomaterial responses to these exposures. A theoretical model was also proposed explaining the conversion of the samples of the transition characteristic of the four-terminal with the impedance of the biomaterial to the Cole graph of this biomaterial.

Conclusion. The study confirms that the use of a linear biomaterial impedance model contributes to the formation of descriptors based on the amplitude-phase-frequency characteristic, taking into account its dissipative properties. Building a Cole graph taking into account these dissipative characteristics allows us to develop classifiers of medical risks of socially significant diseases.

Keywords: medical risk; four-terminal device; bioimpedance; software and hardware complex; amplitude-phase response.

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

For citation: Korsunskii N.A., Reutov D.K., Malyshev A.A., Tomakova R.A. Model of information support for a regional operator for the management of municipal solid waste. *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(2): 126–141. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-126-141>

Received 28.04.2024

Accepted 20.05.2024

Published 28.06.2024

Введение

В современном мире информационные технологии играют все более значимую роль в различных сферах человеческой деятельности, включая медицину. Одним из важных направлений применения информационных систем в медицине является прогнозирование медицинских рисков. Случаи любого риска, снижающего продолжительность жизни или ухудшающего здоровье человека, рассматриваются как медицинские риски. Одной из главных проблем современной медицины является не только лечение заболеваний, но и их предупреждение. Прогнозирование и возможности оценки возникновения медицинских рисков важны для профилактики заболеваний и их лечения [1]. В связи с этим разработка различных методов для раннего выявления инфекционных рисков может помочь создать комплекс мер для сохранения качества жизни пациента и более эффективной реабилитации [2].

Для обеспечения своевременного и точного прогнозирования медицинских рисков необходимо включение систем поддержки принятия решений (СППР) в состав информационных систем [3]. Прогнозирование медицинских рисков позволяет выявить факторы, которые могут привести к развитию определенных заболеваний, и принять меры по их устранению. Информационные системы предоставляют возможность анализировать большие объемы данных, включая данные о состоянии здоровья пациентов, генетическую информацию, результаты анализов и обследований, что помогает выявить скрытые закономерности и связи между различными факторами и заболеваниями [4].

Прогнозирование медицинских рисков с помощью информационных систем имеет ряд преимуществ. Во-первых, это позволяет персонализировать подход к лечению, учитывая индивидуальные особенности каждого пациента. Во-вторых, это способствует более раннему выявлению потенциальных проблем и предупреждению осложнений. В-третьих, это помогает оптимизировать процессы диагностики и лечения, сокращая время и затраты на лечение [5].

Однако, несмотря на все преимущества, прогнозирование медицинских рисков с помощью информационных систем также имеет свои ограничения и вызывает определенные вопросы. Одним из главных вызовов является обеспечение конфиденциальности и безопасности медицинских данных, так как они содержат чувствительную информацию о пациентах. Также важно учитывать этические аспекты использования информационных систем в медицине, чтобы избежать возможных негативных последствий.

В целом прогнозирование медицинских рисков с помощью информационных систем является актуальным и перспективным направлением развития современной медицины. Это позволяет повысить эффективность лечения, улучшить качество жизни пациентов и снизить затраты на здравоохранение. Однако для успешной реализации этого подхода необходимо учитывать все аспекты, связанные с безопасностью, конфиденциальностью и этическими нормами, чтобы обеспечить максимальную пользу от использования информационных систем в медицине.

Одним из инновационных методов, который становится все более

актуальным, являются биоимпедансные исследования [6]. Следует отметить, что основное преимущество биоимпедансных исследований заключается в их безвредности и безопасности для пациентов. Этот метод не требует применения радиации или инвазивных процедур, что делает его идеальным для повторного использования и мониторинга состояния пациента в динамике. Применение биоимпедансных исследований позволяет отслеживать изменения, происходящие в составе тела пациента и в соответствии с этим корректировать программы лечения и реабилитации в зависимости от результатов.

Таким образом, биоимпедансные исследования представляют собой важный инструмент для диагностики состояний пациента и контроля за его здоровьем. Их актуальность заключается в возможности получения точных и надежных данных о составе тела, что способствует более эффективному лечению и улучшению качества жизни пациентов.

Исследования, проведенные в работе [7], показали возможность имитационного моделирования применительно для медицинских информационных технологий, позволяющих оценить объективное состояние пациентов на основе биоимпеданса.

Биоимпедансные исследования могут быть полезны при диагностике различных состояний и заболеваний. Например, они могут помочь в оценке состава тела у пациентов с ожирением, сахарным диабетом, сердечно-сосудистыми заболеваниями и другими патологиями [8].

В настоящее время изучение важной информации, получаемой из анализа

спектра импеданса, находится пока на начальном этапе, это направление перспективно для возможности проведения неинвазивными диагностики различных заболеваний и прогнозирования патологий в будущем [9].

В процессе проведения измерений проводится анализ проводимости при помощи слабых зондирующих токов [10]. Наиболее эффективным является метод, в основе которого предусмотрена возможность построения графика Коула [11]. Этот метод основан на исследовании амплитудно-фазочастотных характеристик (АФЧХ) двухполюсного эквивалента импеданса биоматериала, включенного в цепь источника зондирующего тока [12]. Важно при этом поддерживать морфологическую однородность и целостность биоматериала при проведении биоимпедансных исследований [13]. Также следует устанавливать необходимый диапазон частот зондирующего тока и осуществлять реализацию заданного шага с учетом диссипативных свойств импеданса биоматериала, поэтому процесс измерений требует значительных временных затрат [14]. Это становится актуальной проблемой для выполнения всех перечисленных требований.

Материалы и методы

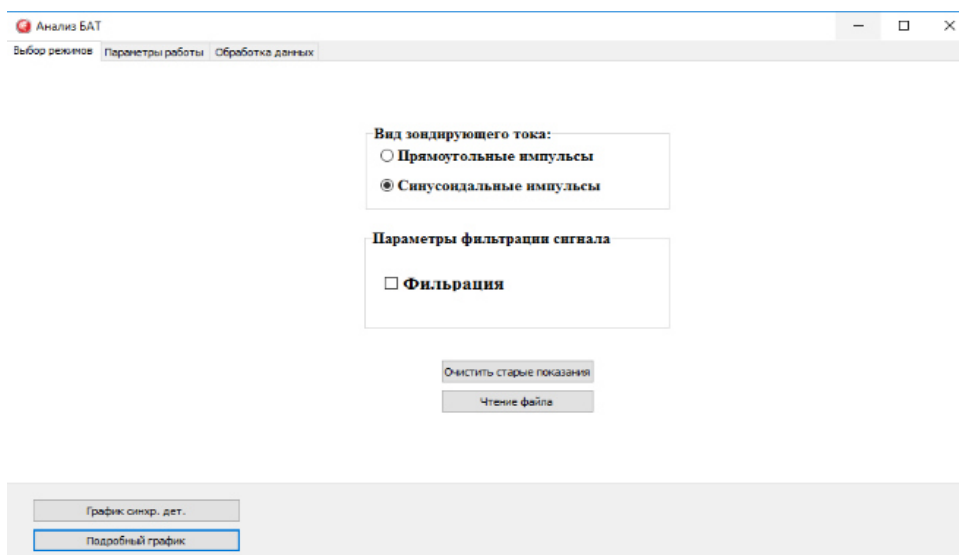
Архитектура программно-аппаратного комплекса (ПАК) для биоимпедансных исследований биологических объектов представляет собой результат разработки, конструирования и тестирования специализированного комплекса [15].

Использование двухканального 12-разрядного цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) и усилителя, встроенного в УСО, позволяют устанавливать

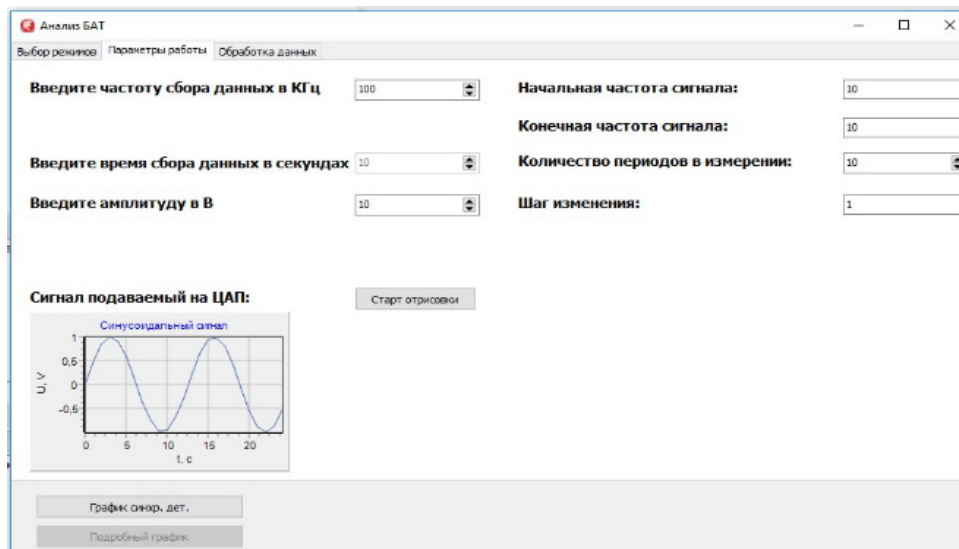
постоянное напряжение в диапазоне ± 15 В для воздействия на биообъект [16]. Кроме того, ПАК предоставляет возможность не только цифровой обработки, но и визуализации полученной переходной характеристики по заданным параметрам [17].

Для разработки программного обеспечения использовалась среда RAD Studio XE8 со встроенной библиотекой L-Card (Lisbari LCome) [18].

Интерфейс запускаемого диалогового окна представлен ниже (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Основное диалоговое окно программы (начальный интерфейс, открывающийся при запуске): а – выбор типа сигнала, б – установка настроек

Fig. 1. Main dialog window of the program (initial interface that opens when launched): а – selection of signal type; б – setting adjustment

Программное обеспечение было разработано в среде Delphi RAD Studio

XE 8. Рассмотрим схему взаимодействия модулей программного продукта (рис. 2).

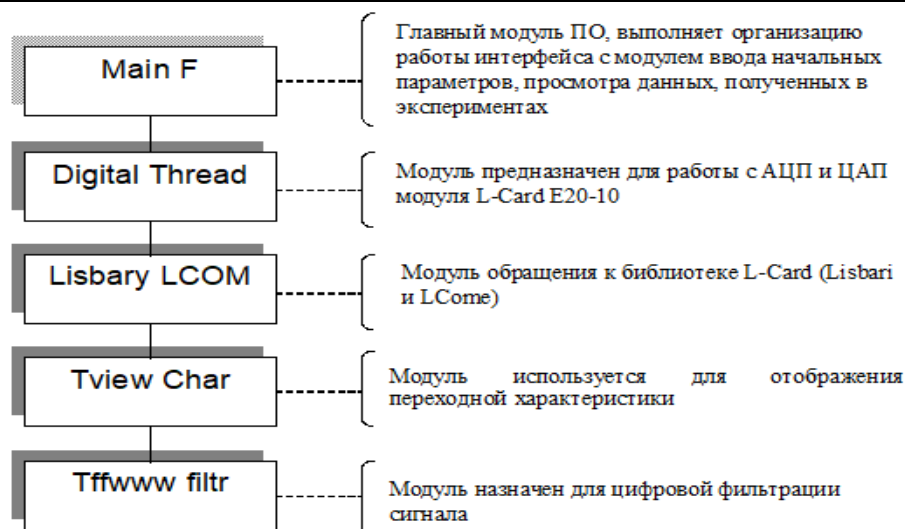


Рис. 2. Схема взаимодействия модулей программного продукта

Fig. 2. Scheme of interaction of software product modules

В процессе моделирования переходных характеристик, возникающих в биоматериале при проведении биоимпедансных исследований, применялась эквивалентная схема пассивного RC-двухполюсника, предложенная Коулом

[19]. На рисунке 3 представлена электрическая схема такого двухполюсника [20], с помощью которой осуществляется процесс моделирования импеданса биоматериала (блок выделен пунктирной линией).

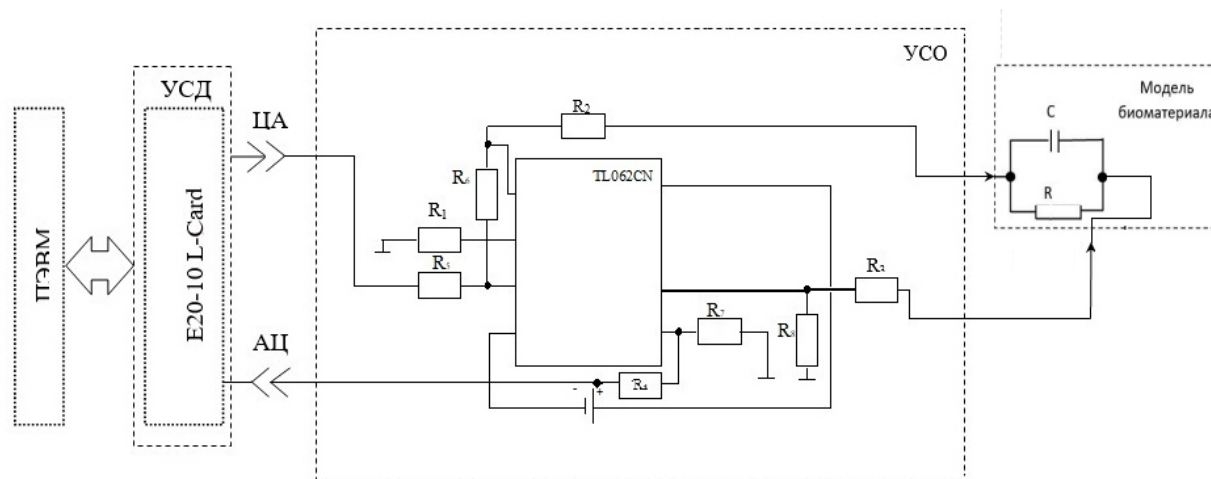


Рис. 3. Функциональная схема устройства для оцифровки переходных характеристик биоматериала

Fig. 3. Functional diagram of the device for digitizing the transient characteristics of biomaterial

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим схему алгоритма для построения графика Коула для анализа биоматериала (рис. 4). Реализация

предложенного алгоритма дает возможность анализировать зависимости вещественной и мнимой части импеданса биоматериала в зависимости от частот для следующих параметров ($R_T = 100$ кОм и 0,1

мкФ). Эти зависимости приведены ниже (рис. 5).

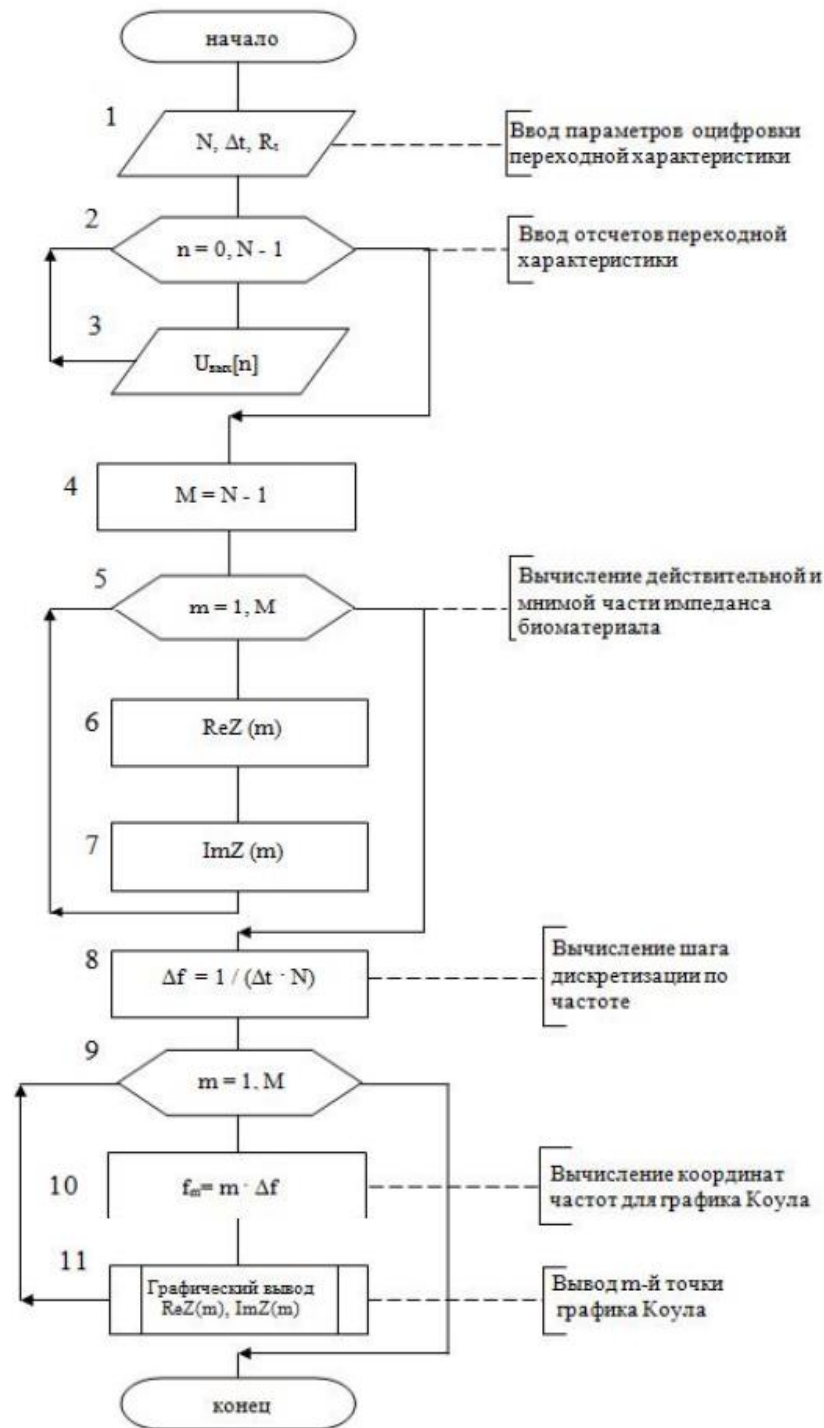


Рис. 4. Схема алгоритма для формирования значений вещественной и мнимой части импеданса биоматериала по системе частот

Fig. 4. The scheme of the algorithm for calculating the values of the real and imaginary parts of the biomaterial impedance according to the frequency system

Результаты проведенных экспериментальных исследований выполнялись

при изменении параметров: $U \in [0,15]$ В;
 $\Delta \in [0,10]$ МГц, $\sin \omega t \in [1,20]$ Гц.

Рассмотрим схему алгоритма получения данных (рис. 6).

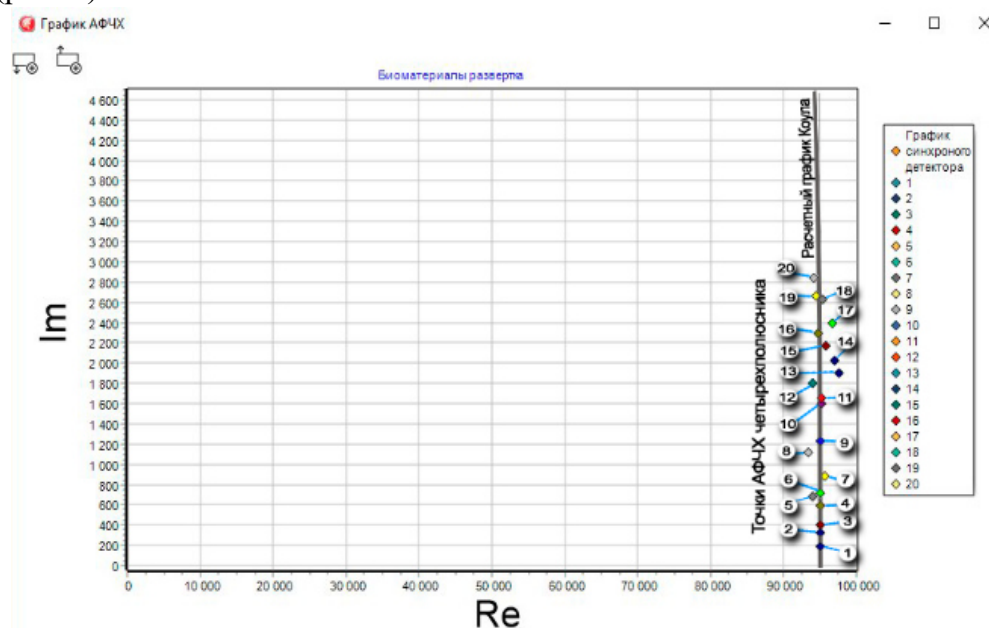


Рис. 5. Зависимости значений вещественной и мнимой части импеданса биоматериала по системе частот

Fig. 5. Dependencies of real and imaginary parts of the biomaterial impedance values across the frequency system

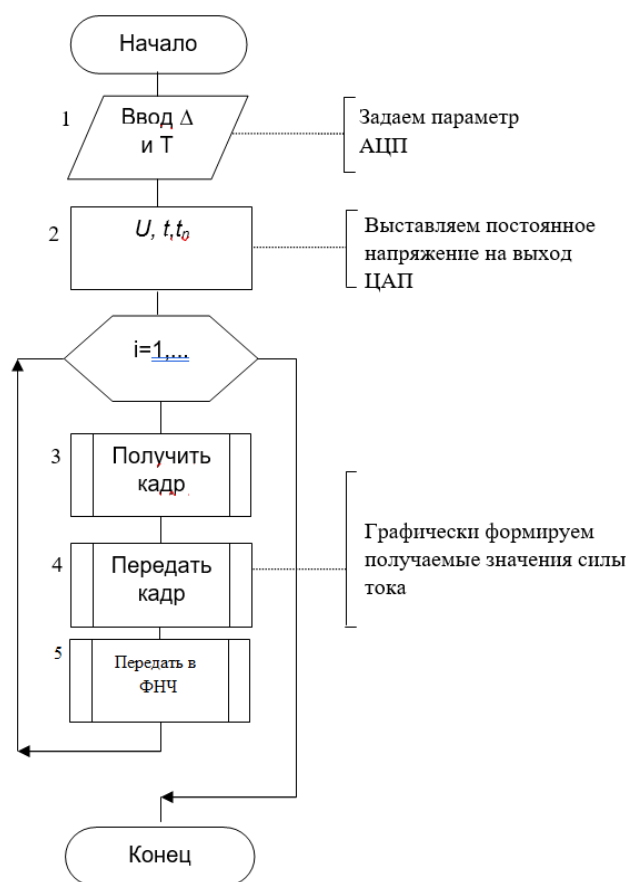
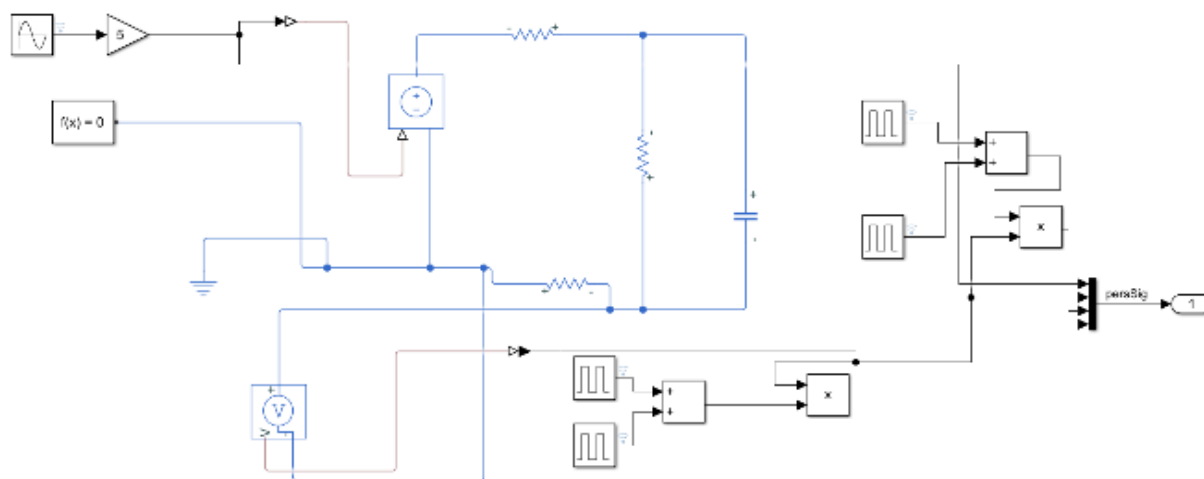


Рис. 6. Схема алгоритма передачи данных посредством L-Card**Fig. 6.** Diagram of data acquisition through L-Card

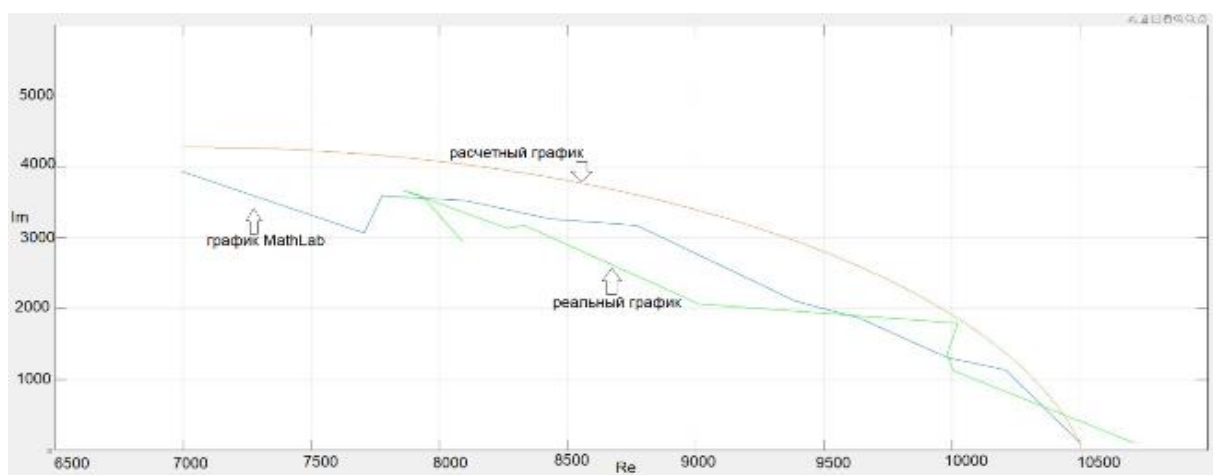
В процессе реализации алгоритма пользователю предлагается выбор значений величины напряжения, частоты дискретизации, периода подачи напряжения и времени сбора данных. Частота дискретизации выбирается исходя из желаемой точности и уровня зашумленности данных.

Для проверки работоспособности ПАК была разработана модель в Mathlab

Simulink (рис. 7). Затем были проведены сравнительные анализы, включающие теоретические значения, значения, полученные в результате проектирования в Mathlab Simulink, и реальные значения (рис. 7). После синхронных детекторов сигнал проходит программную фильтрацию во время обработки.



а



б

Рис. 7. Анализ работоспособности ПАК на основе модели, разработанной в Mathlab Simulink: а – схема для получения расчетных значений на основе модели фантома; б – значения, полученные с фантомом на реальной модели, модели в Simulink и на расчетных значениях

Fig. 7. Analysis of the performance of the PAK based on the model developed in Matlab Simulink:
 а – a scheme for obtaining calculated values based on the phantom model; б – the values obtained with the phantom on the real model, the model in Simulink and on the calculated values

При проведении эксперимента производилось 200 измерений на фантоме, представляющем реальную и проектную модели. Следует заметить, что средняя ошибка значений для проектных данных составила менее 4%, что свидетельствует о высокой точности полученных результатов. В то же время для реальной модели наблюдается большее расхождение, где значения колеблются в пределах

6%. Эти значения позволяют сделать вывод о том, что программно-аппаратный комплекс (ПАК) может быть успешно применен в биоимпедансных исследованиях.

При оцифровки экспериментальных данных, получены значения вещественной и мнимой составляющей, которые продемонстрированы в сравнении с моделируемыми значениями (рис. 8).

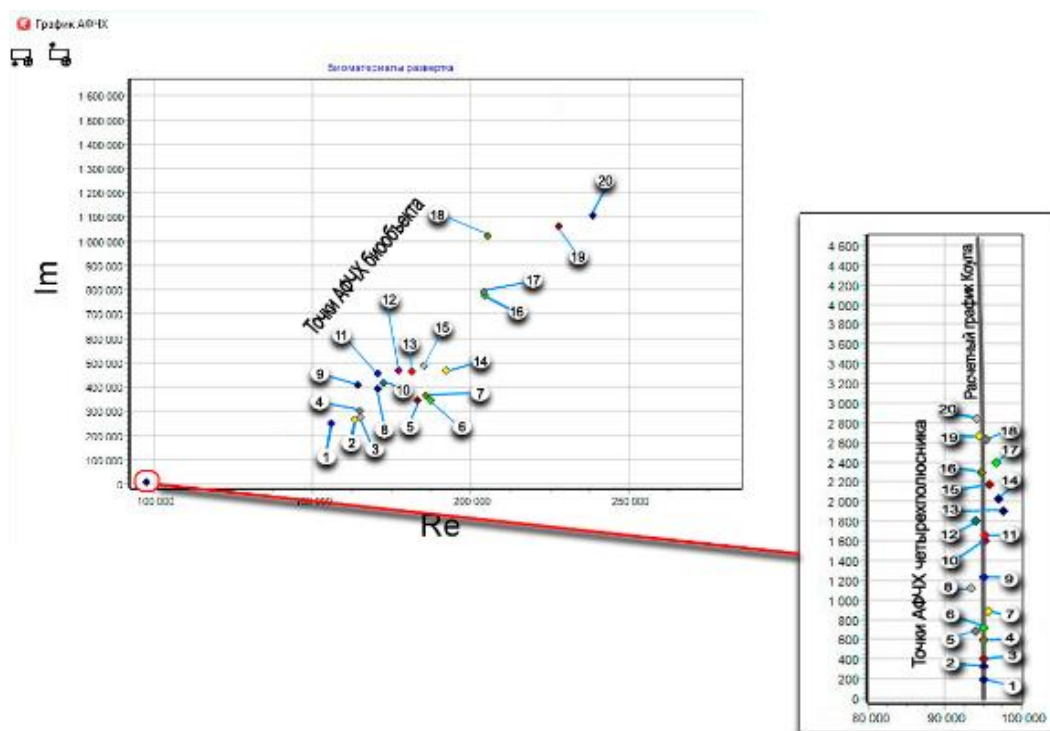


Рис. 8. Интерфейсы программного продукта режима визуализации данных

Fig. 8. Interfaces of the software product in visualization mode

Сравнительный анализ вещественной и мнимой частей импеданса показывает их существенное отличие от четырехполосников, однако разность фаз остается постоянной.

Для формирования результатов было выбраны следующие периоды взаимодействия (с): $[0;10]$, $[100;110]$,

$[190;200]$. Результаты продемонстрированы ниже (рис. 9).

Помимо временного интервала единичного исследования необходимо учитывать время до восстановления поврежденных тканей контактной поверхности биообъекта, которое не превышает 1 ч. Для проведения эксперимента была

сформирована группа из 10 участников мужского и женского пола возрастом не старше 25 лет. В процессе эксперимента

биоимпедансные показатели регистрировались с интервалами в 5, 15, 30 и 60 мин.

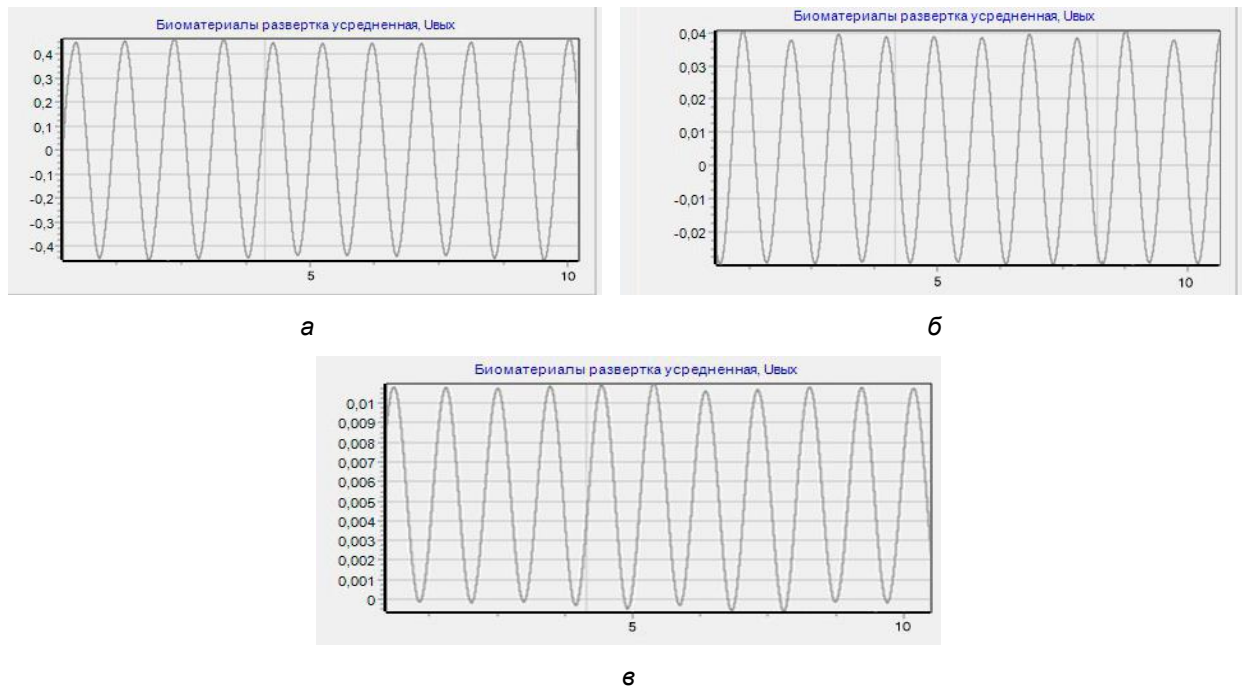


Рис. 9. Интервалы биоимпедансных исследований биообъекта: а – исследование от 0 до 10 с; б – исследование от 100 до 110 с; в – исследование от 190 до 200 с

Fig. 9. Intervals of bioimpedance investigation: а – investigation from 0 to 10 s; б – investigation from 100 to 110 s; в – investigation from 190 to 200 s

В результате анализа полученных данных было установлено значительное искажение импульса при интервале исследований в 5 и 15 мин (рис. 8, в), заметное искажение на интервале от 30 мин до 60 мин (рис. 8, б), и лишь спустя 60 мин все биообъекты вернулись к исходным морфологическим показателям (рис. 8, а).

Сравнение данных исследования показало зависимость результатов от времени воздействия на биообъект, обусловленную разрушением ткани контактной поверхности, в связи с чем возникает необходимость в ограничении как времени единичного исследования, так и в ограничении частоты

исследований за определенный временной промежуток.

Выводы

Разработан процесс цифровой обработки переходной характеристики на биоматериале и построения графика АФЧХ. Для контроля электрических свойств биоматериала целесообразно использовать вольтамперные характеристики при линейно изменяющихся напряжениях.

Дальнейшее развитие ПАК предусматривает работу с сохраненными файлами, улучшенные возможности визуализации для детального изучения переходных характеристик, а также потенциал для выявления рисков

инфекционных заболеваний в условиях пандемии. Эта система может быть

использована в медицинских учреждениях для дополнительной диагностики.

Список литературы

1. Анализ нормы ст. 41 УК РФ об обоснованном риске с точки зрения теоретической обоснованности. URL: http://studbooks.net/1116912/pravo/meditsinskiy_risk_obosnovannogo_riska (дата обращения: 11.03.2024).

2. Ростовцев В. Н. Классификация медицинских рисков. URL: <http://www.kmsd.su/vracham/nauchnye-stati/klassifikatsiya-meditsinskikh-riskov-rostovtsev-v-n> (дата обращения: 11.03.2024).

3. Шаталова О. В. Интеллектуальные системы мониторинга медицинских рисков с учетом биоимпедансных исследований: монография / Юго-Западный гос. ун-т. Курск, 2020. 356 с.

4. Гибридные нечеткие модели для прогнозирования возникновения и осложнений артериальной гипертензии с учетом энергетических характеристик биоактивных точек / М. А. Ефремов, С. А. Филист, О. В. Шаталова, Е. А. Старцев, Л. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8, № 4 (29). С. 104–119.

5. Katherine J. Wu There are more viruses than stars in the universe. URL: <https://www.nationalgeographic.com/science/2020/04/factors-allow-viruses-infect-humans-coronavirus> (дата обращения: 12.03.2024).

6. Shatalova O. V., Burmaka A. A., Korovin E. N. Impedance models in anomalous electrical conduction zones forming by in-vivo experiments for intelligent systems of socially important diseases diagnostic // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi: IEEE, 2018. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501668>

7. Вянищев Я. А., Пилюсян Э. А. Нейронные сети в медицине // Актуальные задачи математического моделирования информационных технологий. 2018. Т. 1, № 1. С. 30–39.

8. Зонова, Я. А., Пилюсян А. С. Применение искусственных нейронных сетей в медицине // Лучшая студенческая статья. 2018. Т. 1, № 1. С. 59–61.

9. Bay Z., Gong Y., Tian X. The Rapid Assessment and Early Warning Models for COVID-19 // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020. Vol. 21, N 4. P. 272–279. <https://doi.org/10.26577/ijbch-2018-1-313>

10. Корсунский Н. А., Томакова Р. А., Брежнев А. В. Программное обеспечение, предназначенное для оцифровки переходной характеристики, при проведении биоимпедансных исследований на биологическом объекте // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. № 1. С. 50–67.

11. Программно-аппаратный комплекс для формирования дескрипторов в системе поддержки принятия решений по диагностике медицинских рисков / Н. А. Корсунский,

А. В. Мирошников, О. В. Шаталова, З. У. Протасова, А. В. Серебровский // Лазеры. Измерения. Информация. 2021. № 1. С. 43–54.

12. Метрологические аспекты автоматизированного метода измерения биоимпеданса / Е. А. Печерская, В. В. Антипенко, О. В. Карпанин [и др.] // Приборы, системы и изделия медицинского назначения. 2020. № 3 (33). С. 78–84.

13. 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.

14. Мирошников А. В., Шаталова О. В., Стадниченко Н. С. Классификация биологических объектов на основе многомерного биоимпедансного анализа // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 29–49.

15. Метрологические аспекты автоматизированного метода измерения биоимпеданса / Е. А. Печерская, В. В. Антипенко, О. В. Карпанин [и др.] // Приборы, системы и изделия медицинского назначения. 2020. № 3 (33). С. 78–84.

16. Agrebi S., Larbi A. Use of artificial intelligence in infectious diseases // Medical Decision Making. 2020. Vol. 6, N 3. P. 415–438. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817133-2.00018-5>

17. Begoli E., Agrebi S., Larbi A. The need for uncertainty quantification in machine-assisted medical decision making // Nature Machine Intelligence. 2019. Vol. 1, N 1. P. 20–23. <https://doi.org/10.1038/s42256-018-0004-1>

18. Алгоритм оптимизации модели Войта в классификаторах функционального состояния живых систем / А. В. Мирошников, О. В. Шаталова, Н. С. Стадниченко, М. А. Ефремов, А. Ю. Новоселов, А. В. Павленко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 2. С. 59–75.

19. Sarvamangala D. R., Raghavendra V. K. Convolutional neural networks in medical image understanding: a survey // Evolutionary Intelligence. 2022. Vol. 3, N 1. P. 151–173. <https://doi.org/10.1007/s12065-020-00540-3>

20. State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey / I. A. Oludare, A. Jantan, V. D. Kemi, H. Asrshad // Heliyon. 2018. Vol. 4, N 11. P. 160–204. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00938>

References

1. Analysis of the norm of Article 41 of the Criminal Code of the Russian Federation on reasonable risk from the point of view of theoretical validity. (In Russ.) Available at: http://studbooks.net/1116912/pravo/meditsinskiy_risk_obosnovannogo_riska (accessed 11.03.2024).

2. Rostovtsev V.N. Classification of medical risks. (In Russ.) Available from: <http://www.kmsd.su/vracham/nauchnye-stati/klassifikatsiya-meditsinskikh-riskov-rostovtsev-v-n> (accessed 11.03.2024).
3. Shatalova O.V. Intellectual systems for monitoring medical risks taking into account bioimpedance studie. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2020. 356 p. (In Russ.)
4. Efremov M.A., Filist S.A., Shatalova O.V., Startsev E.A., Shulga L.V. Hybrid fuzzy models for predicting the occurrence and complications of arterial hypertension taking into account the energy characteristics of bioactive points. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2018;8(4):104–119. (In Russ.)
5. Catherine J. There are more viruses in the universe than there are stars. (In Russ.) Available at: <https://www.nationalgeographic.com/science/2020/04/factors-allow-viruses-infect-humans-coronavirus> (accessed 12.03.2024).
6. Shatalova O.V., Burmaka A.A., Korovin E.N. Impedance models in anomalous electrical conduction zones forming by in-vivo experiments for intelligent systems of socially important diseases diagnostic. In: International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi: IEEE; 2018. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501668>
7. Vyasnichev Y.A., Pilosyan E.A. Neural Networks in Medicine. *Aktual'nye zadachi matematicheskogo modelirovaniya informatsionnykh tekhnologii = Current Issues in Mathematical Modeling of Information Technologies*. 2018;1(1):30–39.
8. Zonova Y.A., Pilosyan A.S. Application of Artificial Neural Networks in Medicine. *Luchshaya studencheskaya stat'ya = Best Student Article*. 2018;1(1):59–61. (In Russ.)
9. Bay Z., Gong Y., Tian X. The Rapid Assessment and Early Warning Models for COVID-19. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;21(4):272–279. <https://doi.org/10.26577/ijbch-2018-1-313>
10. Korsunsky N.A., Tomakova R.A., Brezhnev A.V. Software designed for digitizing the transient response during bioimpedance studies on a biological object. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2021;(1):50–67. (In Russ.)
11. Korsunsky N.A., Tomakova R.A., Brezhnev A.V. Software-Hardware Complex for Descriptor Generation in Decision Support Systems for Medical Risk Diagnosis. *Lazery. Izmereniya. Informatsiya = Lasers. Measurements. Information*. 2021;(1):43–54. (In Russ.)
12. Pecherskaya E.A., Antipenko V.V., Karpanin O.V., et al. Metrological Aspects of the Automated Bioimpedance Measurement Method. *Pribory, sistemy i izdeliya meditsinskogo naznacheniya = Instruments, Systems, and Products for Medical Purposes*. 2020;(3):78–84. (In Russ.)
13. Kiselyov A.V., Shatalova O.V., Protasova Z.U., Filist S.A., Stadnichenko N.S. Models of latent predictors in intellectual systems forecasting the state of living systems. *Izvestiya*

Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2020;10(1):114–133. (In Russ.)

14. Miroshnikov A.V., Shatalova O.V., Stadnichenko N.S. Classification of biological objects based on multidimensional bioimpedance analysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020;10(3/4):29–49. (In Russ.)

15. Pecherskaya E.A., Antipenko V.V., Karpanin O.V., et al. Metrological aspects of the automated method of bioimpedance measurement. *Pribory, sistemy i izdeliya meditsinskogo naznacheniya = Medical Devices, Systems, and Products.* 2020;(3):78–84. (In Russ.)

16. Agrebi S., Larbi A. Use of artificial intelligence in infectious diseases. *Medical Decision Making.* 2020;6(3):415–438. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817133-2.00018-5>

17. Begoli E., Agrebi S., Larbi A. The need for uncertainty quantification in machine-assisted medical decision making. *Nature Machine Intelligence.* 2019;1(1):20–23. <https://doi.org/10.1038/s42256-018-0004-1>

18. Miroshnikov A.V., Shatalova O.V., Stadnichenko N.S., Efremov M.A., Novoselov A.Y., Pavlenko A.V. Voigt model optimization algorithm in classifiers of the functional state of living systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022;12(2):59–75. (In Russ.)

19. Sarvamangala D.R., Raghavendra V.K. Convolutional Neural Networks in Medical Image Understanding: A Survey. *Evolutionary Intelligence.* 2022;3(1):151–173. <https://doi.org/10.1007/s12065-020-00540-3>

20. Oludare I.A., Jantan A., Kemi V.D., Asrshad H. State-of-the-Art in Artificial Neural Network Applications: A Survey. *Heliyon.* 2018;4(11):160–204. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00938>

Информация об авторах / Information about the Authors

Корсунский Никита Александрович, аспирант кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, e-mail: cor.nick2013@yandex.ru, г. Курск, Российская Федерация, ORCID: 0009-0005-4606-5517

Nikita A. Korsunsky, Post-Graduate Student of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: cor.nick2013@yandex.ru, ORCID: 0009-0005-4606-5517

Реутов Дмитрий Константинович, преподаватель кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sdfh.sgh@inbox.ru,

Dmitry K. Reutov, Lecturer of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sdfh.sgh@inbox.ru, ORCID: 0009-0007-6969-2286

ORCID: 0009-0007-6969-2286

Малышев Антон Александрович, студент
кафедры программной инженерии,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: alta76@yandex.ru,
ORCID: 0009-0001-4838-6710

Anton A. Malyshev, Student of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: alta76@yandex.ru,
ORCID: 0009-0001-4838-6710

Томакова Римма Александровна,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры программной инженерии,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: rtomakova@mail.ru,
Researcher ID: O-6164-2015,
ORCID: 0000-0003-152-4714

Rimma A. Tomakova, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Professor of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: rtomakova@mail.ru,
Researcher ID: O-6164-2015,
ORCID: 0000-0003-152-4714

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-142-159>



УДК 621.391.26

Мультимодальный классификатор риска рака молочной железы на основе анализа импеданса биоматериала

А. В. Серебровский¹, О. В. Шаталова¹✉, А. В. Лях¹,
И. А. Халин¹, И. А. Башмакова¹, З. У. Протасова¹

¹ Юго-Западный государственный университет

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

✉ e-mail: shatolg@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Рак молочной железы является наиболее распространенной злокачественной опухолью среди женщин в Европе, и его раннее выявление играет ведущую роль в снижении уровня смертности. В настоящее время рентгеновская маммография является стандартным методом скрининга для выявления рака молочной железы. Однако из-за морфологического сходства между доброкачественными и злокачественными образованиями многие из положительных скрининговых маммограмм оказываются ложноположительными (до 40%). Поэтому автоматизация и интеллектуализация этого процесса являются актуальной задачей.

Методы. В представленных исследованиях рассмотрены проблемы поиска новых, высокочувствительных, оперативных и неинвазивных методов обнаружения злокачественных образований, основанных на использовании современных компьютерных и телекоммуникационных технологий, позволяющих не только идентифицировать ранние проявления патологического очага, но и осуществлять мониторинг процесса эффективности терапии без существенного вреда здоровью пациента.

Результаты. Представленная модель многоканального классификатора интегрирует возможности многочастотной биоимпедансометрии и матричного съема информации с поверхности кожи человека посредством многоэлектродных матричных систем. Для этого на основе матрицы электродов осуществляется 3D-картирование поверхности кожи в проблемных областях. За счет многочастотного сканирования получаем трехмерное биоимпедансное изображение, которое анализируется посредством сверточной нейронной сети и/или лицом, принимающим решение. Предложенное решение позволяет одновременно анализировать данные экспертом (биоимпедансное изображение) и сверточной нейронной сетью (обучаемый классификатор), что приводит к снижению ложноположительных результатов.

Заключение. Возможности многоканального контроля открывают перспективы построения импедансных многомерных «портретов» злокачественных образований. Для классификации «портретов» (диагностики и доклинической диагностики) привлекаются методы и алгоритмы распознавания и классификации изображений.

Ключевые слова: рак молочной железы; биоимпедансная спектроскопия; классификатор; нейронная сеть; алгоритм.

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

Финансирование: Исследования выполнены в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» программы стратегического академического лидерства «Приоритет – 2030».

© Серебровский А. В., Шаталова О. В., Лях А. В., Халин И. А., Башмакова И. А., Протасова З. У., 2024

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024; 14(2): 142–159

Для цитирования: Мультимодальный классификатор риска рака молочной железы на основе анализа импеданса биоматериала / А. В. Серебровский, О. В. Шаталова, А. В. Лях, И. А. Халин, И. А. Башмакова, З. У. Протасова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 2. С. 142–159. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-142-159>

Поступила в редакцию 17.04.2024

Подписана в печать 15.05.2024

Опубликована 28.06.2024

Multimodal breast cancer risk classifier based on biomaterial impedance analysis

Andrey V. Serebrovsky¹, Olga V. Shatalova¹✉, Anton V. Lyakh¹,
Igor A. Khalin¹, Irina A. Bashmakova¹, Zeinab U. Protasova¹

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

✉ e-mail: shatolg@mail.ru

Abstract

Purpose of the research. Breast cancer is the most common malignant tumor among women in Europe and its early detection plays a leading role in reducing mortality rates. Currently, X-ray mammography is the standard screening method for detecting breast cancer. However, due to the morphological similarities between benign and malignant lesions, many of the positive screening mammograms are false positive (up to 40%). Therefore, automation and intellectualization of this process is an urgent task.

Methods. The presented studies examine the problems of finding new, highly sensitive, prompt and non-invasive methods for detecting malignant tumors, based on the use of modern computer and telecommunication technologies, which make it possible not only to identify early manifestations of a pathological focus, but also to monitor the process of the effectiveness of therapy without significant harm to the patient's health.

Results. The presented model of a multi-channel classifier integrates the capabilities of multi-frequency bioimpedance measurements and matrix acquisition of information from the surface of human skin through multi-electrode matrix systems. To do this, based on a matrix of electrodes, 3D mapping of the skin surface in problem areas is carried out. Through multi-frequency scanning, we obtain a three-dimensional bioimpedance image, which is analyzed by a convolutional neural network and/or by a decision maker. The proposed solution allows simultaneous analysis of data by an expert (bioimpedance image) and a convolutional neural network (trained classifier), which leads to a reduction in false positive results.

Conclusion. The possibilities of multichannel monitoring open up prospects for constructing impedance multidimensional "portraits" of malignant tumors. To classify "portraits" (diagnostics and preclinical diagnostics), methods and algorithms for image recognition and classification are used.

Keywords: breast cancer; bioimpedance spectroscopy; classifier; neural network; algorithm.

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

Funding: The research was carried out within the framework of the development program of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Southwestern State University" of the strategic academic leadership program "Priority – 2030".

For citation: Serebrovsky A.V., Shatalova O.V., Lyakh A.V., Khalin I.A., Bashmakova I.A., Protasova Z.U. Multimodal breast cancer risk classifier based on biomaterial impedance analysis. *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(2): 142–159. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-142-159>

Received 17.04.2024

Accepted 15.05.2024

Published 28.06.2024

Введение

Рак молочной железы (РМЖ) является наиболее распространенной злокачественной опухолью среди женщин. Раннее выявление РМЖ играет ведущую роль в снижении уровня смертности. В настоящее время рентгеновская маммография является стандартным методом скрининга для выявления РМЖ [1]. Однако она имеет ряд ограничений, включая снижение способности выявлять карциному у женщин с плотной тканью молочной железы (МЖ). Кроме того, из-за морфологического сходства между доброкачественными и злокачественными образованиями маммография менее полезна в качестве диагностического метода. Пациенткам с положительными результатами маммографии для окончательной диагностики требуется биопсия. Биопсия поражений МЖ, обнаруженных при маммографическом обследовании, дает отрицательный результат на злокачественность у 80% пациенток [2]. Таким образом, многие из положительных скрининговых маммограмм оказываются ложноположительными. Это означает, что скрининг на основе рентгеновской маммографии имеет довольно низкую специфичность, хотя и высокую чувствительность. При проведении биопсии МЖ пациентки получают как физическую, так и эмоциональную травму. Более совершенный метод диагностики позволил бы сократить число пациенток с доброкачественными поражениями молочной железы, которые

подвергаются ненужной диагностической биопсии, а также уменьшить травмы пациенток и расходы на здравоохранение. Другие методы, такие как ультразвук и магнитно-резонансная томография (МРТ), могут помочь в диагностике рака МЖ. Однако эти методы все еще имеют различные ограничения [3].

В последнее время использование методов биоимпедансного анализа для обнаружения рака МЖ стало новым направлением, поскольку было найдено больше доказательств того, что злокачественные опухоли МЖ имеют значительно отличающийся импеданс от нормальных тканей [4]. Электрический импеданс можно использовать для разделения доброкачественных и злокачественных опухолей и, следовательно, уменьшить количество доброкачественных биопсий [3]. Однако существует ряд проблем, которые ограничивают их клиническое применение, включая выявление РМЖ [5]. Ключевым ограничением биоимпедансным методам диагностики РМЖ является их низкое пространственное разрешение. Основными причинами этого являются неточное моделирование системы, изменяющийся импеданс контакта электрода с кожей, ограниченное количество независимых измерений и низкое соотношение сигнал / шум [6].

Увеличение количества электродов представляется целесообразным решением для улучшения пространственного разрешения. Однако простое увеличение

количества электродов не только увеличивает сложность аппаратного и программного обеспечения, но и повысит необходимость решения проблем, связанных с позиционированием и локализацией электродов [7]. В ограниченном пространстве, таком как человеческая грудь, наложение большого количества электродов на МЖ с высокой надежностью и хорошим контактом остается сложной проблемой [8].

Неинвазивные методы визуализации биоимпеданса можно разделить на две основные категории – электроимпедансная томография (ЭИТ) и картирование электрического импеданса (КЭИ) [3]. В ЭИТ большое количество измерений импеданса производится с помощью электродов, расположенных на поверхности тела, а результаты обрабатываются компьютером для получения реконструированных томографических 2D- или 3D-изображений распределения импеданса (проводимости и / или проницаемости) внутри тела. В основе визуализации ЭИТ лежит значительная вариация электрического импеданса между различными типами тканей [7]. В ЭИТ существует как статическая, так и динамическая визуализация. Статическая визуализация предполагает получение изображения распределения абсолютной проводимости или импеданса, а динамическая визуализация восстанавливает изображения изменения проводимости, полученного в результате изменения напряжения на электродах [8]. Успех системы ЭИТ зависит от сбора данных и реконструкции изображения.

При КЭИ к телу прикладывается переменное напряжение заданной частоты и амплитуды, приложенное между

массивом из нескольких чувствительных электродов, покрывающих поверхность участка тела, подлежащего визуализации, и большим индифферентным электродом, расположенным в другом месте тела. Несколько чувствительных электродов поддерживаются при одинаковом потенциале, в то время как токи через электроды измеряются. Рассчитанные значения местного объемного импеданса под чувствительными электродами затем проецируются на поверхность и отображаются в виде двумерных изображений. Будучи концептуально более простым, чем ЭИТ, КЭИ не требует буквально никакой сложной реконструкции изображения. При этом, используя методы биоимпедансной спектроскопии, можем приблизить информативность КЭИ к ЭИТ, не прибегая к решению некорректно поставленной задачи с соответствующими методами реконструкции [4].

Материалы и методы

За основу метода классификации риска заболеваний МЖ принят мультимодальный подход, основанный на методе биоимпедансной спектроскопии [9]. Согласно этому подходу, необходимо построить несколько моделей классификаторов, которые основаны на различных методах классификации и на различных методах формирования дескрипторов, с последующей агрегацией их решений [10]. В системе поддержки принятия врачебных решений (СППВР) предлагается использовать три информационных канала классификации риска заболеваний МЖ, соответствующие трем используемым методам [11].

В первом канале строится классификатор на основе локальной спектроскопии биоимпеданса [12]. При этом интегрирование данных по частотам зондирования осуществляется методами, изложенными в [13]. На каждом отведении определяется график Коула. Дескрипторы формируются только по данным, полученным от одной электродной пары матрицы электродов [14]. В этом канале осуществляется многочастотное зондирование биоматериала, и он рассчитан на локальный анализ биоматериала МЖ. Используя классификатор этого канала, можем обнаружить области интереса, изображения которых могут быть получены во втором канале. Схема измерения в первом канале представлена ниже (рис. 1).

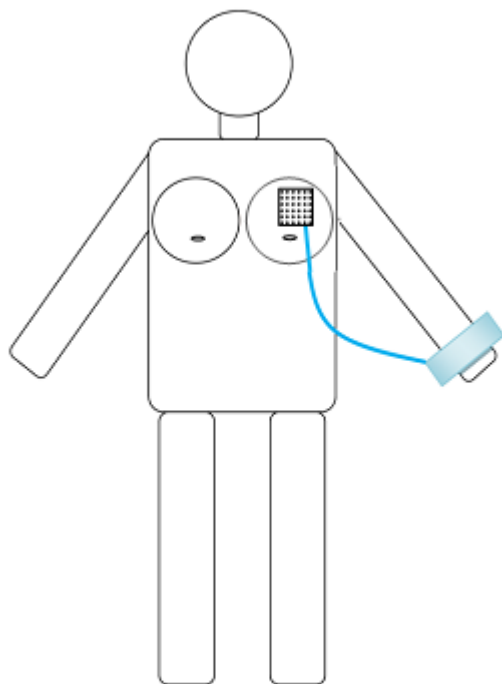


Рис. 1. Схема измерения биоимпеданса в первом канале

Fig. 1. Scheme for measuring bioimpedance in the first channel

Биоимпедансный преобразователь (конструкцию которого иллюстрирует рис. 2) накладывается на области интереса МЖ. При этом в качестве сигнальных электродов используются электроды матрицы электродов (рис. 3), которые непосредственно контактируют с поверхностью кожи МЖ. Электроды получают методом напыления или химического травления на гибкой полиимидной пленке (рис. 3). Индифферентный электрод может быть прикреплен к любой конечности (рис. 1).

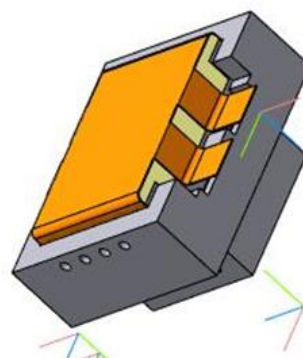


Рис. 2. Конструкция биоимпедансного преобразователя

Fig. 2. Bioimpedance transducer design

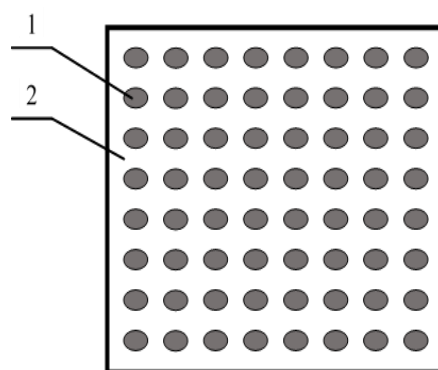


Рис. 3. Матрица электродов биоимпедансного преобразователя: 1 – электрод; 2 – полиимидная подложка

Fig. 3. Matrix of electrodes of the bioimpedance converter: 1 – electrode; 2 – polyimide substrate

Во время измерения между индифферентным электродом и измерительными электродами матрицы электродов на биоимпедансном преобразователе прикладывается переменное напряжение 1...2,5 В. Ток проходит от руки пациента к высокопроводящей грудной мышце, которую можно рассматривать как изопотенциальную плоскость. Таким образом, между грудной мышцей и зондом, прижатым к груди лежащего пациента, создается примерно параллельная электрическая конфигурация. Исходя из этой конфигурации прижатие зонда к груди врачом во время обследования уменьшает расстояние между измерительным зондом и грудной мышцей, что повышает чувствительность для обнаружения искаженного электрического поля, вызванного наличием злокачественной опухоли. В диапазоне частот измерения 50 Гц...20 кГц рассчитываются амплитуда и фаза индуцированного тока на каждом отведении [6]. Сигнал источника также дискретизируется и служит в качестве опорного сигнала [15]. Эти сигналы в сочетании с передаточной функцией системы используются для расчета сопротивлений в каждом отведении, которые используются в качестве дескрипторов в модели машинного обучения [16].

Так как на выходе автономных интеллектуальных агентов (АИА), из которых формируется мультиканальный классификатор, получаем искусственные «дескрипторы» в виде параметров графиков Коула [17], релевантность которых не изучена, то для их агрегации используем сверточную нейронную сеть (СНС), которая рассматривает выходы АИА в качестве «сырых» данных.

Учитывая, что на входе СНС должно быть одно или несколько изображений, то из выходов АИА формируются малокадровые растровые изображения, каждый пиксель которых отражает данные, полученные с одного отведения, а число изображений определяется числом частот тока зондирования [7].

Таким образом, СНС формирует второй канал, который осуществляет глобальный анализ биоматериала МЖ, т. е. анализируется одновременно вся информация, поступающая с матрицы электродов. В нем для решения проблемы повышения диагностической чувствительности маммографических исследований используются СНС в малокадровом режиме [5]. Для этого на основе матрицы электродов осуществляется 3D-картирование поверхности кожи в проблемных областях. За счет многочастотного сканирования получаем трехмерное биоимпедансное изображение, которое анализируется посредством СНС [18]. Предложенное решение позволяет одновременно анализировать данные экспертом (биоимпедансное изображение) и СНС (обучаемый классификатор), что должно привести к снижению ложноположительных результатов [19].

На входе СНС формируются малокадровые изображения, размер кадра которых определяется размером матрицы электродов [20]. В то же время число таких изображений на входе определяется числом зондирующих частот, используемых для диагностики функционального состояния биоматериала. Так как на выходе СНС ставится полносвязная нейронная сеть, то ее выход должен ответить на вопрос: есть ли онкология и

нужна ли биопсия? Так как первый канал в принципе отвечает на тот же самый вопрос, то их решения можно объединить с помощью агрегатора или использовать показания первого канала в качестве навигатора матрицы электродов во втором канале [5].

Третий канал является экспертным каналом. Он синтезирует биоимпедансное изображение МЖ, которое, в свою очередь, является многоканальным за счет использования множества частот тока зондирования биоматериала. Для его реализации используется устройство визуализации для выявления РМЖ, которое включает индифферентный электрод, удерживаемый в руке пациента (рис. 1). Индифферентный электрод представляет собой металлический цилиндр (диаметр 3...4 см, длина 12 см), а биоимпедансный преобразователь содержит плоский массив прямоугольных электродов размерностью 16×16, разделенных прямоугольными решетками. Каждый электрод имеет площадь 3×3 мм. Межцентровое

расстояние между электродами составляет 4 мм, оставляя 1 мм пространства между соседними электродами (рис. 3). Защитное кольцо в виде металлической полосы шириной 7 мм окружает зону зондирования для предотвращения электрических краевых эффектов. В качестве среды между чувствительной зоной и поверхностью груди используется проводящий гель.

Хотя на выходе имеем массив отсчетов размерности, определяемой количеством электродов в матрице электродов, агрегирование изображений осуществляет лицо, принимающее решение (ЛПР), на основе импедансных изображений. Изображения, связанные с биоимпедансом, отображаются на мониторе в виде полутонового изображения. На рисунке 4 представлены в качестве примера три биоимпедансных 2D-изображения, полученные на фантоме МЖ на трех частотах при использовании 16 отведений.

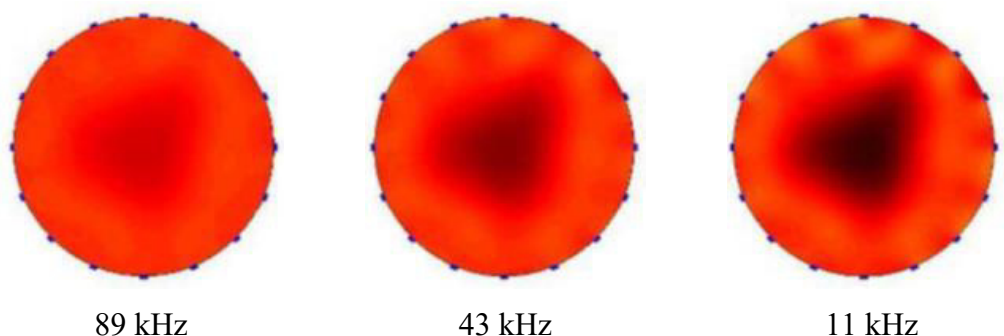


Рис. 4. Примеры биоимпедансных изображений, полученных на трех частотах посредством 16-элементной матрицы на фантоме молочной железы

Fig. 4. Examples of bioimpedance images obtained at three frequencies using a 16-element array on a breast phantom

Таким образом, предложена достаточно сложная интеллектуальная биотехническая система, в которой ЛПР,

получая соответствующую информацию от первых двух каналов, может оценить ее нечеткость и на основе этой

информации и визуальной биоимпедансной картины управлять положением матрицы электродов таким образом, чтобы повысить достоверность информации по другим каналам в ту или иную сторону. Предложенное решение позволяет одновременно анализировать данные экспертом (биоимпедансное изображение) и СНС (обучаемый классификатор), что должно привести к снижению ложноположительных результатов.

За основу метода спектроскопии биоимпеданса взят метод, в котором для классификации сегмента биообъекта строится его модель в виде пассивного двухполюсника, накладываются электроды на выделенный сегмент биоматериала и осуществляется многочастотное зондирование на стольких частотах, сколько требуется для определения параметров модели пассивного двухполюсника. Классификация биообъекта осуществляется по дескрипторам, полученным по параметрам моделей двухполюсников [15].

Метод классификации функционального состояния биообъектов осуществляется на основе представления импеданса биоматериала в виде модели Войта. Процесс классификации биоматериала начинается с построения графиков Коула для всех отведений. Реальная и мнимая составляющие биоимпеданса на каждой частоте тока зондирования рассчитываются как проекции вектора комплексного биоимпеданса на соответствующие оси [16].

В предлагаемом методе измерения биоимпеданса электродная пара (или отведение) образуется путем коммутации электродов матрицы из N электродов к генератору зондирующего тока и включению биоматериала МЖ в цепь между этим электродом и индифферентным электродом. Каждое отведение соответствует определенному геометрическому направлению электрического поля в биоматериале. Для каждого отведения строится модель импеданса сегмента биоматериала, включенного в это отведение. В качестве модели сегмента биоматериала используется рекурсивная модель Войта [15].

Устройство для сбора «сырых» данных для мультимодального классификатора риска рака молочной железы

Использование биоимпедансной 3D-спектроскопии может не только улучшить локализацию опухоли для облегчения биопсии, но и помочь отсеять ложноположительные результаты, вызванные артефактами, такими как повреждения кожи, кости и т. д. Однако для этого необходима система биоимпедансного анализа с достаточно высоким пространственным разрешением и высокой воспроизводимостью. Для достижения этого необходимо увеличение числа независимых измерений и использование надежных средств контакта электродов с кожей, а также реализация различных схем сбора данных и разработка новых алгоритмов реконструкции. Применение многочастотного подхода позволит

повысить точность обнаружения рака молочной железы [6].

Для получения «сырых» данных использовано устройство для биоимпедансных исследований (рис. 5). Процесс классификации биообъекта начинается с формирования отведения посредством выбора электрода матрицы электродов 6 мультимплексором 5. Для всех отведений матрицы электродов 6 вычисляются графики Коула. С этой целью реальная и мнимая составляющие биоимпеданса на токовом резисторе 8 рассчитываются в микроконтроллере 1 как проекции

вектора комплексного биоимпеданса на соответствующие оси опорных квадратурных напряжений. Токовый резистор 8 подключается одним выводом к индифферентному электроду 7, а другим – к общему проводу и является элементом, предназначенным для преобразования ток-напряжение. Его величина подобрана таким образом, чтобы на нем падало как можно меньшее напряжение. Масштабирующий усилитель (МУ) 3 служит для согласования выхода ЦАП с биоматериалом.

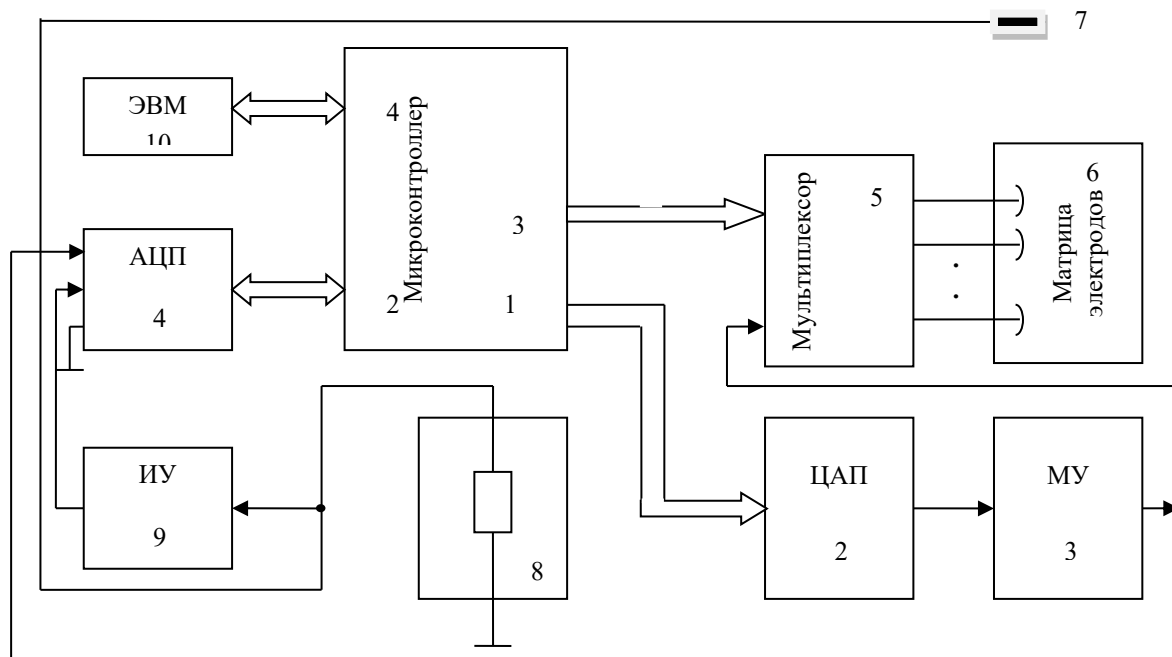


Рис. 5. Структурная схема устройства биоимпедансного анализа, предназначенного для получения «сырых» данных [16]

Fig. 5. Block diagram of a bioimpedance analysis device designed to obtain "raw" data [16]

После получения графиков Коула для всех направлений зондирования осуществляется построение моделей Войта для каждого из этих направлений. Модель состоит из последовательно соединенных RC-звеньев, каждое из которых

моделирует конечную проводимость с соответствующей постоянной времени [16].

После получения сырых данных в СППВР они обрабатываются в трех каналах классификации медицинского

риска. В первом канале строится классификатор локальной спектроскопии биоимпеданса. Это значит, что решение принимается только по данным, полученным от одной электродной пары матрицы электродов – от одного отведения. Дескрипторы в этом канале вычисляются на основе результатов многочастотного зондирования, предусматривающего локальный анализ биоматериала МЖ. Используя классификатор этого канала, можем обнаружить области интереса. На рисунке 6 представлена структурная схема классификатора. Классификация биообъекта осуществляется по дескрипторам, полученным по графикам Коула моделей импеданса биоматериала в соответствующих отведениях [15].

Классификатор первого канала
мультимодального классификатора

имеет трехуровневую иерархическую структуру. На первом уровне имеем 16 слабых классификаторов, соответствующих отведениям, полученным в одном из четырех сегментов матрицы электродов, размером 4×4 . Каждый сегмент электродной матрицы (всего их четыре) определяет топологию тока в биоматериале МЖ, поэтому на втором иерархическом уровне имеем четыре слабых классификатора, которые объединяют решения классификаторов первого уровня, работающих с дескрипторами, полученными на одном и том же сегменте. В каждом отведении определяются по шесть дескрипторов для мнимой и действительных частей графика Коула [8].

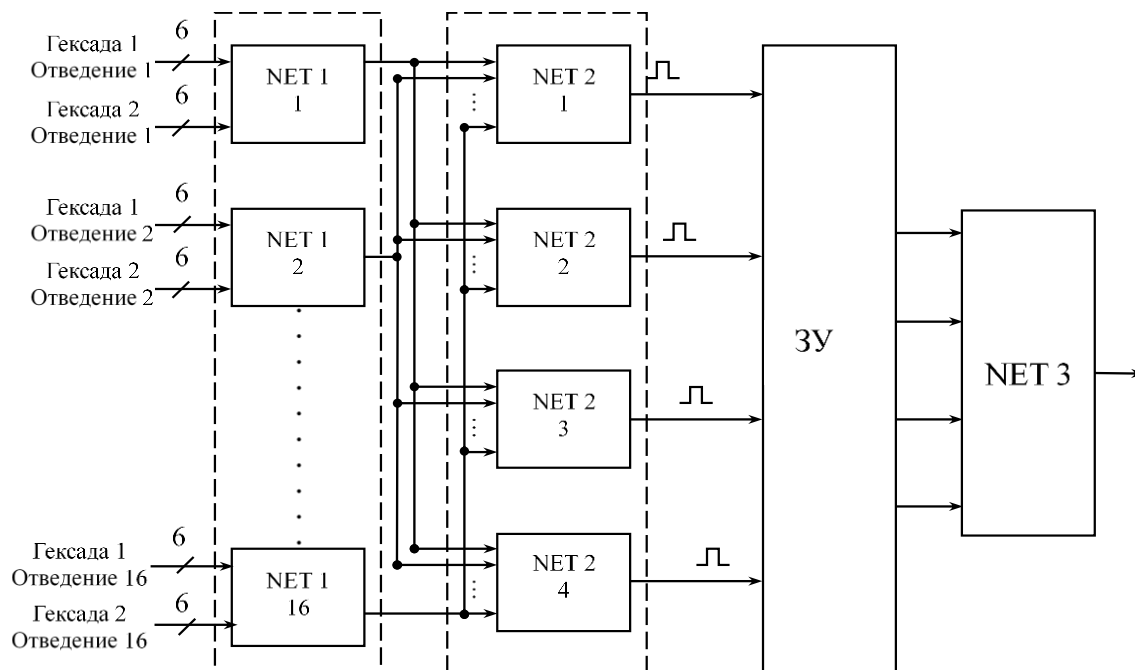


Рис. 6. Структурная схема классификатора в первом канале мультимодального классификатора для одного отведения

Fig. 6. Block diagram of the classifier in the first channel of the multimodal classifier for one lead

Каждый классификатор первого класса настраивается автономно по соответствующему набору данных. Агрегатор NET 3 построен на основе полносвязной нейронной сети. Для его обучения используются результаты классификации данных, поступающих с выходов классификаторов второго уровня (NET 2) [6]. Учитывая, что отведения формируются последовательно во времени, решения классификаторов второго уровня хранятся в запоминающем устройстве (ЗУ).

Результаты и их обсуждение

Для экспериментального исследования эффективности предлагаемого способа было осуществлено сравнение показателей качества предлагаемой структуры классификатора и результатов ультразвуковой маммографии. Были проанализированы результаты обследования 62 пациенток с установленным диагнозом РМЖ (TNM). У всех пациенток было взято информированное добровольное согласие на участие в экспериментальных исследованиях, а также посредством УЗИ МЖ были определены размеры опухоли и расстояния от ее верхнего края до кожи. Диагноз РМЖ был подтвержден посредством гистологических исследований.

При измерении глубины расположения опухоли минимизировалось давление УЗИ-датчика на поверхность кожи МЖ с целью адекватного измерения показателя. Средняя глубина расположения опухоли составила 1,2 см, IQR

(0,7...1,6 см). Средний размер опухоли составил 2 см, IQR (1,6...2,7 см).

Диагностическая чувствительность предлагаемого способа составила 0,60. Диагностическая специфичность – 0,70. Это несколько ниже показателей УЗИ по чувствительности и несколько выше по специфичности, получаемых на опухолях, сопоставимых по размеру и по глубине. При этом показатели качества диагностики предлагаемого способа практически не зависели от IQR в исследуемой экспериментальной группе.

Показатели качества диагностики цифровой рентгеновской маммографии составляют по диагностической чувствительности 0,89 и по диагностической специфичности 0,71. Это выше показателей УЗИ и биоимпедансного анализа. Однако при размере поражения МЖ менее 10 мм в диаметре диагностическая чувствительность при высокой плотности МЖ падает до 40%, а при низкой плотности МЖ – до 70%.

Таким образом, представленный способ позволяет определить риск онкологического заболевания по результатам спектроскопии биоимпеданса в области дислокации матрицы электродов и учитывает анизотропию биоимпеданса, которая является одним из релевантных признаков онкологического заболевания [21]. Способ также дает возможность контролировать реакции организма на лечебно-оздоровительные процедуры, следовательно, позволяет осуществлять управление планом лечения [22].

Выводы

Таким образом, создана принципиально новая модель интеллектуальной поддержки принятия врачебных решений, интегрирующая возможности спектроскопии биоимпеданса, СНС и экспертного оценивания. Следует отметить, что современные данные, подтверждающие возможность разделения доброкачественных и злокачественных опухолей

МЖ с помощью методов биоимпедансометрии, весьма ограничены. Необходимы дальнейшие исследования этого вопроса, чтобы в полной мере использовать методы, основанные на биоимпедансном анализе, для выявления рака МЖ, особенно для дифференциальной диагностики рака МЖ. Если это удастся, можно ожидать сокращения числа доброкачественных биопсий.

Список литературы

1. Алиева Г. С., Корженкова Г. П., Колядина И. В. Анализ ключевых рентгенологических характеристик раннего инвазивного рака молочной железы стадий T_{1a}-bN₀M₀ и DCIS // Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия. 2021. Т. 4, № 1. С. 9–19. <https://doi.org/10.37174/2587-7593-2021-4-1-9-19>
2. Объективизация топографо-анатомических показателей злокачественной опухоли молочной железы при ультразвуковом исследовании / А. Р. Хамитов, А. Х. Исмагилов, Н. А. Савельева, И. А. Киясов // Поволжский онкологический вестник. 2017. Т. 1, № 28. С. 59–64.
3. Zou Y., Guo Z. A review of electrical impedance techniques for breast cancer detection // Medical Engineering & Physics. 2003. Vol. 25, N 2. P. 79–90. [https://doi.org/10.1016/s1350-4533\(02\)00194-7](https://doi.org/10.1016/s1350-4533(02)00194-7)
4. Пат. 2504328 Российская Федерация. Устройство для контроля анизотропии электрической проводимости биотканей / Томакова Р. А., Филист С. А., Кузьмин А. А., Кузьмина М. Н., Алексенко В. А., Волков И. И. № 2012128471/14; заявл. 06.07.12; опубл. 20.01.14.
5. Шаталова О. В. Интеллектуальные системы мониторинга медицинских рисков с учетом биоимпедансных исследований: монография / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2020. 356 с.
6. Технологии биоимпедансной спектроскопии в системах поддержки принятия решений при диагностике социально значимых заболеваний / О. В. Шаталова, Н. С. Стадниченко, М. А. Ефремов, И. А. Башмакова, А. В. Лях, А. В. Серебровский // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 148–174. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-148-174>

7. Биомедицинская спектроскопия в классификаторах функционального состояния органов и систем человека, построенных на основе гибридных технологий искусственного интеллекта / О. В. Шаталова, А. В. Серебровский, Н. С. Стадниченко, А. Ю. Новоселов, А. В. Лях // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2023. Т. 22, № 2. С. 100-113. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.22.2.015>
8. Модели импеданса биоматериала для формирования дескрипторов в интеллектуальных системах диагностики инфекционных заболеваний / А. В. Мирошников, Н. С. Стадниченко, О. В. Шаталова, С. А. Филист // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8, № 4. С. 1–14. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.018>
9. Филист С. А., Кассим К. Д. А., Руцкой Р. В. Гибридные решающие системы для прогнозирования послеоперационных осложнений у больных с доброкачественной гиперплазией предстательной железы // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 5 (50). С. 40–49.
10. Гибридные интеллектуальные модели для сегментации изображений рентгенограмм грудной клетки / С. А. Филист, Р. А. Томакова, С. В. Дегтярев, А. Ф. Рыбочкин // Медицинская техника. 2017. № 5 (305). С. 41–45.
11. Филист С. А., Томакова Р. А., Насер А. А. Нечеткие нейросетевые технологии для выделения сегментов с патологическими образованиями и морфологическими структурами на медицинских изображениях // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 4. С. 43–50.
12. Филист С. А., Емельянов С. Г., Рыбочкин А. Ф. Нейросетевой решающий модуль для исследования живых систем // Известия Курского государственного технического университета. 2008. № 2 (23). С. 77–82.
13. Жилин В. В., Филист С. А., Аль-Муаалеми В. А. Гибридный способ классификации биосигналов на основе технологий нечеткой логики принятия решений и нейронных сетей // Биомедицинская радиоэлектроника. 2009. № 5. С. 77–82.
14. A method for creating fuzzy neural-network models using the MATLAB package for biomedical applications / V. V. Zhilin, S. A. Filist, Kh. A. Rakhim, O. V. Shatalova // Biomedical Engineering. 2008. N 42 (2). P. 64–66. <https://doi.org/10.1007/s10527-008-9019-y>
15. Алгоритм оптимизации модели Войта в классификаторах функционального состояния живых систем / А. В. Мирошников, О. В. Шаталова, М. А. Ефремов, Н. С. Стадниченко, А. Ю. Новоселов, А. В. Павленко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 2. С. 59–75. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-59-75>

16. Классификации биологических объектов на основе многомерного биоимпедансного анализа / А. В. Мирошников, О. В. Шаталова, Н. С. Стадниченко, Л. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 29–49.
17. Филист С. А., Шаталова О. В., Богданов А. С. Модели биоимпеданса при нелинейной вольтамперной характеристике и обратимом пробое диэлектрической составляющей биоматериала // Бюллетень сибирской медицины. 2014. Т. 13, № 4. С. 129–135.
18. Использование гибридных нейросетевых моделей для многоагентных систем классификации в гетерогенном пространстве информативных признаков / А. Г. Курочкин, В. В. Жилин, С. А. Суржикова, С. А. Филист // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2015. № 3 (31). С. 85–95.
19. Курочкин А. Г., Протасова В. В., Филист С. А., Шуткин А. Н. Нейросетевые модели для метаанализа медико-экологических данных // Нейрокомпьютеры. Разработка, применение. 2015. № 6. С. 42–48.
20. Филист С. А., Шаталова О. В., Ефремов М. А. Гибридная нейронная сеть с макрослоями для медицинских приложений // Нейрокомпьютеры. Разработка и применение. 2014. № 6. С. 35–39.
21. Распределенные автономные интеллектуальные агенты для мониторинга и мета-анализа эффективности управления живыми системами / Т. В. Петрова, А. А. Кузьмин, Д. Ю. Савинов, В. В. Серебровский // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2017. № 40 (4). С. 61–73.
22. Структурно-функциональная модель для мониторинга влияния управляющих воздействий на функциональное состояние самоорганизующихся систем / П. С. Кудрявцев, А. Н. Шуткин, В. В. Протасова, С. А. Филист // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2015. № 2 (30). С. 105–118.

References

1. Alieva G.S., Korzhenkova G.P., Kolyadina I.V. Analysis of Key Radiographic Characteristics of Early Invasive Breast Cancer, Stages T_{1a}-bN₀M₀ and DCIS. *Onkologicheskii zhurnal: lucheвая diagnostika, lucheвая terapiya = Journal of Oncology: Diagnostic Radiology and Radiotherapy*. 2021;4(1):9–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.37174/2587-7593-2021-4-1-9-19>
2. Khamitov A.R., Ismagilov A.K., Savelyeva N.A., Kiyasov I.A. Objectification of topographic-anatomical indicators of breast cancer with ultrasound examination. *Povolzhskii Onkologicheskii Vestnik = Oncology Bulletin of the Volga Region*. 2017;1(28):59–64 (In Russ.)

3. Zou Y., Guo Z. A review of electrical impedance techniques for breast cancer detection. *Medical Engineering & Physics*. 2003;25(2):79–90. [https://doi.org/10.1016/s1350-4533\(02\)00194-7](https://doi.org/10.1016/s1350-4533(02)00194-7)
4. Tomakova R.A., Filist S.A., Kuz'min A.A., Kuz'mina M.N., Aleksenko V.A., Volkov I.I. Device for controlling the anisotropy of electrical conductivity of biotissues. Russian Federation Patent, 2504328, 20 January, 2014. (In Russ.)
5. Shatalova O.V. Intelligent systems for monitoring medical risks taking into account bioimpedance studies. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2020. 356 p. (In Russ.)
6. Shatalova O.V., Stadnichenko N.S., Efremov M.A., Bashmakova I.A., Lyakh A.V., Serebrovsky A.V. Technologies of Bioimpedance Spectroscopy in Decision Support Systems for the Diagnosis of Socially Significant Diseases. *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(4);148–174. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-148-174>
7. Shatalova O.V., Serebrovsky A.V., Stadnichenko N.S., Novoselov A.Y., Lyakh A.V. Bioimpedance spectroscopy in classifiers of the functional state of human organs and systems based on hybrid artificial intelligence technologies. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2023;22(2):100–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.22.2.015>
8. Miroshnikov A.V., Stadnichenko N.S., Shatalova O.V., Filist S.A. Biomaterial impedance models for the formation of descriptors in intelligent systems for the diagnosis of infectious diseases. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technologies*. 2020;8(4):1–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.018>
9. Filist S.A., Kassim K.D.A., Rutskoi R.V. Hybrid decisive systems for forecasting of postoperative sequelae at patients with benign gyperplazia of the prostate gland. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2013;(5):40–49. (In Russ.)
10. Filist S.A., Tomakova R.A., Degtyarev S.V., Rybochkin A.F. Hybrid intelligent models for chest X-ray image segmentation. *Meditsinskaya tekhnika = Medical Equipment*. 2017;(5):41–45. (In Russ.)
11. Filist S.A., Tomakova R.A., Naser A.A. Indistinct neural-net technologies for separation of segments with pathologic formations and morphological structures in medical images. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Journal Biomedical Radioelectronics*. 2012;(4):43–50. (In Russ.)

12. Filist S.A., Emel'yanov S.G., Rybochkin A.F. Neural network solver for the study of living systems. *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Kursk State Technical University*. 2008;(2):77–82. (In Russ.)
13. Zhilin V.V., Filist S.A., Al'-Muaalemi V.A. A hybrid method for classifying bi-signals based on fuzzy decision logic technologies and neural networks. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Journal Biomedical Radioelectronics*. 2009;(5):77–82. (In Russ.)
14. Zhilin V.V., Filist S.A., Rakhim K.A., Shatalova O.V. A method for creating fuzzy neural-network models using the MATLAB package for biomedical applications. *Biomedical Engineering*. 2008;(42):64–66. <https://doi.org/10.1007/s10527-008-9019-y>
15. Miroshnikov A.V., Shatalova O.V., Efremov M.A., Stadnichenko N.S., Novoselov A.Y., Pavlenko A.V. Method for Classification of the Functional State of Living Systems Based on Recurrent Voigt Models. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2022;12(2):59–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-59-75>
16. Miroshnikov A.V., Shatalova O.V., Stadnichenko N.S., Shulga L.V. Classification of biological objects based on multidimensional bioimpedance analysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2020;10(3/4):29–49. (In Russ.)
17. Filist S.A., Shatalova O.V., Bogdanov A.S. Bioimpedance models at the nonlinear volt-ampere characteristic and Reversible breakdown of the dielectric component of the bio-material. *Byulleten' sibirskoi meditsiny = Bulletin of Siberian Medicine*. 2014;3(4):129–135. (In Russ.)
18. Kurochkin A.G., Zhilin V.V., Surzhikova S.A., Filist S.A. Use of hybrid neural network models for multi-agent systems of classification in heterogeneous space of informative signs. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technology*. 2015;(3):85–95. (In Russ.)
19. Kurochkin A.G., Protasova V.V., Filist S.A., Shutkin A.N. Neurosetevye modeli dlya meta-analiza mediko-ekologicheskikh dannykh [Neural network model for meta-analysis of medical and ecological data]. *Neirokomp'yutery. Razrabotka, primeneniye = Journal Neurocomputers*, 2015, no. 6, pp. 42–48. (In Russ.)
20. Filist S.A., Shatalova O.V., Efremov M.A. Hybrid neural network with macro layers for medical applications. *Neirokomp'yutery. Razrabotka i primeneniye = Journal Neurocomputers*. 2014;(6):35–39. (In Russ.)

21. Petrova T.V., Kuz'min A.A., Savinov D.Y, Serebrovskiy V.V. Distributed autonomous intellectual agents for monitoring and metaanalysis of living systems management effectiveness. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technology*. 2017;(40):61–73. (In Russ.)

22. Kudryavtsev P.S., Shutkin A.N., Protasova V.V., Filist S.A. Structural functional model for monitoring the influence of control actions on self-organizing systems state. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technology*. 2015;(2):105–118. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Серебровский Андрей Вадимович, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Шаталова Ольга Владимировна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: shatolg@mail.ru, Researcher ID: C-3687-2015, ORCID: 0000-0002-0901-9272

Лях Антон Викторович, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru, ORCID: 0009-0008-6217-2840

Халин Игорь Алексеевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: russianrocket1996@yandex.ru, ORCID: 0009-0004-1205-2139

Andrey V. Serebrovsky, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Olga V. Shatalova, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: shatolg@mail.ru, Researcher ID: C-3687-2015, ORCID: 0000-0002-0901-9272

Anton V. Lyakh, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru, ORCID: 0009-0008-6217-2840

Igor A. Khalin, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: russianrocket1996@yandex.ru, ORCID: 0009-0004-1205-2139

Башмакова Ирина Алексеевна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электроснабжения, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Irina92_2010@mail.ru, ORCID: 0009-0001-1402-7349

Протасова Зейнаб Усама, кандидат технических наук, преподаватель кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zeinab.zeidan@yandex.ru, Researcher ID: HNP-2721-2023, ORCID: 0009-0001-8716-8329

Irina A. Bashmakova, Candidate of Sciences (Engineering), Senior Lecturer of the Department of Electricity Supply, Southwest State University, Kursk, Russia Federation, e-mail: Irina92_2010@mail.ru, ORCID: 0009-0001-1402-7349

Zeinab U. Protasova, Candidate of Sciences (Engineering), Lecturer of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russia Federation, e-mail: zeinab.zeidan@yandex.ru, Researcher ID: HNP-2721-2023, ORCID: 0009-0001-8716-8329

МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-160-180>



УДК 57.087

Метод синтеза моделей оценки состояния оперативной памяти операторов человеко-машинных систем на основе нечеткой логики принятия решений

Н. А. Корневский¹, А. Ю. Рыбаков¹, С. Н. Родионова¹✉, К. В. Разумова¹

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

✉ e-mail: knsofia@mail.ru

Резюме

Целью исследования является разработка метода синтеза моделей оценки состояния оперативной памяти операторов человеко-машинных систем, использование которого в решающих правилах прогнозирования и диагностики состояний оперативной памяти и её блоков обеспечивает повышение качества принимаемых решений.

Методы. Для контроля состояния различных блоков оперативной памяти выбран следующий набор методов: поиск сигнала в шуме; «опознание»; полное воспроизведение; определение отсутствующей цифры; объем памяти. Для выбора адекватного математического аппарата исследований был проведен разведочный анализ структуры обрабатываемых данных, в ходе которого было установлено, что выбранные классы состояний оперативной памяти имеют нечеткую природу с неопределенными границами их пересечений. С учетом особенности обрабатываемых данных выбранная методология была модифицирована путем разработки нового метода нечеткой оценки состояния оперативной памяти по характеристикам её свойств в сочетании с информативными признаками, характеризующими эргономику рабочего места, экологическую составляющую и индивидуальные факторы риска.

Результаты. В ходе проведенных исследований была синтезирована модель прогнозирования появления и развития нарушений функции оперативной памяти у операторов информационно насыщенных систем, отличающаяся использованием в качестве предикторов показателей, характеризующих состояние блоков оперативной памяти, позволяющая получать уверенность в правильном принятии решения не хуже 0,85.

Заключение. В ходе проведенных исследований было показано, что для улучшения показателей качества прогнозирования и диагностики состояний оперативной памяти и её блоков при синтезе соответствующих решающих правил следует учитывать показатели, характеризующие состояние блоков оперативной памяти, энергетический разбаланс БАТ, эргономические и индивидуальные факторы риска. При таком подходе в задачах прогнозирования достигается уверенность в правильном принятии решения не хуже 0,85. В задачах диагностики ранних стадий нарушений оперативной памяти у операторов информационно насыщенных систем уверенность в правильном принятии решения превышает величину 0,95.

© Корневский Н. А., Рыбаков А. Ю., Родионова С. Н., Разумова К. В., 2024

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024; 14(2): 160–180

Ключевые слова: оперативная память; человеко-машинные системы; прогнозирование; ранняя диагностика; функциональное состояние; функциональный резерв; 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: Метод синтеза моделей оценки состояния оперативной памяти операторов человеко-машинных систем на основе нечеткой логики принятия решений / Н. А. Корневский, А. Ю. Рыбаков, С. Н. Родионова, К. В. Разумова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 2. С. 160–180. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-160-180>

Поступила в редакцию 14.04.2024

Подписана в печать 06.05.2024

Опубликована 28.06.2024

Method for synthesis of models for assessing the state of ram memory of operators of human-machine systems based on fuzzy decision making logic

Nikolay A. Korenevsky¹, Anton Y. Rybakov¹, Sofia N. Rodionova¹✉,
Ksenia V. Razumova¹

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

✉ e-mail: knsofia@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop a method for synthesizing models for assessing the state of RAM of operators of human-machine systems, the use of which in the decisive rules for predicting and diagnosing the states of RAM and its blocks ensures an increase in the quality of decisions made.

Methods. To monitor the state of various RAM blocks, the following set of techniques was selected: searching for a signal in noise; "identification"; full reproduction; identification of missing digits; Memory. To select an adequate mathematical research apparatus, an exploratory analysis of the structure of the processed data was carried out, during which it was found that the selected classes of RAM states are of a fuzzy nature with uncertain boundaries of their intersections. Taking into account the peculiarities of the processed data, the selected methodology was modified by developing a new method for fuzzy assessment of the state of RAM based on the characteristics of its properties in combination with informative features characterizing the ergonomics of the workplace, the environmental component and individual risk factors.

Results. In the course of the research, a model was synthesized for predicting the appearance and development of dysfunctions of RAM in operators of information-rich systems, characterized by the use of indicators characterizing the state of RAM blocks as predictors, which allows one to obtain confidence in the correct decision-making of no worse than 0,85.

Conclusion. In the course of the studies, it was shown that in order to improve the quality indicators of forecasting and diagnosing the states of RAM and its blocks, when synthesizing the corresponding decision rules, indicators characterizing the state of RAM blocks, energy imbalance of BAP, ergonomic and individual risk factors should be taken into account. With this approach, in forecasting problems, confidence in the correct decision-making is achieved at least 0,85. In the tasks of diagnosing the early stages of RAM disorders among operators of information-rich systems, confidence in correct decision-making exceeds 0,95.

Keywords: elastography; mammary gland; tissue; object; micromechanics; elastic modulus; tensor.

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

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., Rybakov A.Y., Rodionova S.N., Razumova K.V. Analytical modeling of breast elastography. *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(2):160–180. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-160-180>

Received 14.04.2024

Accepted 06.05.2024

Published 28.06.2024

Введение

Исследованию влияния операторской деятельности на когнитивные функции человека, включая функцию памяти, а также вопросам оценки состояния этой функции у различных категорий людей посвящено достаточно много работ, например [1, с. 100; 2, с. 581; 3, с. 8; 4, с. 263]. Специалисты, занимающиеся проблематикой оценки состояния памяти, включая кратковременную и оперативную память, в своих работах [5, с. 242; 6, с. 56; 7, с. 44; 8, с. 53] отмечают, что одной из важнейших задач в этой области знаний и её практических приложений является прогнозирование, своевременное выявление и точная классификация состояний функций памяти, что позволяет обеспечить повышение надежности работы человеко-машинных систем, а также адекватную профилактику и коррекцию возникающих нарушений.

Для исследования функции памяти как одного из когнитивных процессов российские и иностранные ученые разработали довольно большое количество различных тестов и методик, реализованных в компьютерном и бумажном вариантах [9, с. 20–22; 10, с. 45–46; 11, с. 55]. В качестве основы большинства

этих методик используют анализ цифр, букв, слов, рисунков, звуковых стимулов, выполнение заданных действий в ответ на предъявляемые стимулы с расчетом времени реакции и правильности выполнения теста [12, с. 105; 13, с. 104; 14, с. 227].

При анализе известных методов и средств оценки показателей памяти [15, с. 73; 16, с. 265; 17, с. 57] было выявлено, что полученные данные достаточно редко и не всегда эффективно используются для прогнозирования и ранней диагностики состояния функций памяти, включая ее оперативную составляющую, что создает предпосылки для разработки новых и адекватных решаемым задачам методов и средств оценки состояния оперативной памяти, ориентируясь, прежде всего, на роль этого вида памяти в функционировании человеко-машинных систем, управляемых человеком-оператором. При выборе основного математического аппарата исследований мы исходили из того, что он должен соответствовать структуре обрабатываемых данных.

Проведенный разведочный анализ показал, что исследуемые классы состояний оперативной памяти имеют

нечеткую, плохоформализуемую природу с нечеткой зоной пересечений. Как показали многочисленные исследования, в этих условиях целесообразно использовать методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил, разработанную на кафедре биомедицинской инженерии Юго-Западного государственного университета. В качестве основного технического средства тестирования состояния оперативной памяти был выбран прибор контроля свойств функции внимания и памяти, хорошо зарекомендовавший себя при оценке состояний когнитивной функции внимания при решении задач со структурой данных, аналогичной решаемым в работе задачам.

Материалы и методы

На основе микроструктурного анализа деятельности операторов человеко-машинных систем в работе [18, с. 88–89] было показано, что для оценки состояния блоков оперативной памяти (ОП) и оперативной памяти в целом достаточно использовать методики поиска сигнала в шуме (ПСШ), опознания (ОП), полного воспроизведения (ПВВ), определения отсутствующей цифры (ООЦ). Анализ литературы и проведенные нами исследования показали, что значительной информативностью для решаемых в данной работе задач обладает такая характеристика оперативной памяти, как её объем (ОБП). Описание этих методик, условий и способов их выполнения, а также их реализации на планшетном компьютере приведено в работах [19,

с. 83; 20, с. 267; 21, с. 27; 22, с. 256–277]. Программное обеспечение планшетного компьютера, кроме описанных показателей, характеризующих состояние оперативной памяти, позволяет также исследовать такие свойства когнитивной функции внимания, как концентрированность, объем, селективность, переключаемость, распределяемость и устойчивость, что позволяет учитывать совместное проявление этих двух когнитивных функций, повышая качество оценки функционального состояния и состояния здоровья операторов человеко-машинных систем. При интерпретации результатов исследований ОП и её блоков рекомендуется учитывать, что методика ПСШ нагружает операции сенсорного хранения, перекодирования и идентификации стимула, методика ОП нагружает блок хранения информации в кратковременной памяти, методика ПВВ инициирует активное удержание информации и организацию ответа. При этом авторы работы [18, с. 65–69] утверждают, что задействуются все блоки кратковременной памяти, методика ООЦ нагружает блоки, осуществляющие семантические преобразования на уровне взаимодействия кратковременной и долговременной памяти. Анализ реакции блоков ОП на различные типы нагрузок различными методиками позволяет, с одной стороны, оценивать индивидуальные особенности функционирования ОП, а с другой – исследовать влияние различных типов операторской деятельности на работоспособность ОП.

Оценка состояния блоков ОП на основании результатов использования выбранных методик S_j ($j = 1$ для методики оценки ВР, $j = 2$ для ПСШ, $j = 3$ для ОП, $j = 4$ для ПВВ, $j = 5$ для ООЦ, $j = 6$ для ОБП) осуществляется с использованием выражения вида

$$S_j = N T_{cp} / (N - C), \quad (1)$$

где N – число предъявленных серий; C – число ошибок испытуемого; T_{cp} – среднее время реакции испытуемого $\left(T_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \right)$; t_i – время реакции в каждой отдельной серии.

Выбранная для решения задач синтеза решающих правил оценки состояния ОП методология синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП) является представителем технологии мягких вычислений с базовым элементом, определяемым как функция принадлежности $\mu_{\omega_\ell}(x_i)$ к классам ω_ℓ с базовыми переменными, соответствующими существу решаемой задачи, которые агрегируются в соответствующие решающие правила в зависимости от структуры исследуемых классов состояний. Рекомендации по использованию МСГНРП для решения различных типов задач приведены в работах [22, с. 256; 23, с. 378]. Анализ возможностей МСГНРП для решения поставленных в работе задач показал, что для получения искомых решающих правил следует ввести ряд дополнений и рекомендаций, учитывающих структуру данных характерную для описания состояния

когнитивных функций [19, с. 90; 20, с. 268, 21, с. 5].

При разработке предлагаемого метода синтеза моделей оценки состояния оперативной памяти операторов человеко-машинных систем предполагается, что основную информацию о состоянии ОП формирует прибор для оценки внимания и памяти на основе планшетного компьютера (ПОВП), реализующий описанные выше методики. Заявляемый метод реализуется следующей основной последовательностью действий:

1. Формируется группа экспертов, специализирующихся в оценке состояния оперативной памяти. Организуется их подготовка в области исследования влияния операторской деятельности на когнитивные функции человека и синтеза гибридных нечетких решающих правил. Изучаются психофизические особенности операторской работы, на основании чего определяется алфавит классов состояний ω_ℓ (классы функциональных состояний, нарушений функций памяти, профессиональной пригодности, успешности деятельности и др.) и список свойств оперативной памяти, меняющихся под воздействием исследуемого производственного процесса. Определяется список показателей S_j , позволяющих оценивать исследуемые свойства ОП и решать задачи классификации.

2. С использованием метода нечеткой оценки состояния оперативной памяти по характеристикам её свойств для

выбранных классов состояний ω_ℓ определяется список информативных показателей S_j , для которых синтезируются функции принадлежности $\mu_\ell(S_j)$, характеризующие текущее состояние ОП по показателям S_j , определяемых по шкалам прибора ПОВП. С учетом нечеткой природы обрабатываемых данных выбор информативных признаков рекомендуется производить с использованием метода, описанного в работе [24]. В рамках МСГНРП предусмотрено несколько вариантов получения функций принадлежности: экспертный синтез по методу Дельфы при, возможно, полном отсутствии обучающих выборок; с использованием независимых тестов, для которых достоверно устанавливается наличие классов ω_ℓ ; по репрезентативным обучающим выборкам. Если полученные функции принадлежности для методик с идентификатором j используются для синтеза нечетких решающих правил интегральной оценки уверенности US_ℓ в ω_ℓ по нескольким шкалам S_j , то соответствующие функции агрегации выбираются с учетом общих рекомендаций МСГНРП.

Если добавление функций принадлежности $\mu_\ell(S_j)$ для отобранных информативных показателей S_j увеличивает значение оценки уровня соответствия классу ω_ℓ , то выбирается агрегатор типа

$$US_\ell(j+1) = US_\ell(j) + \mu_\ell(S_{j+1})[1 - US_\ell(j)]. \quad (2)$$

Если эксперты считают, что оценка уровня соответствия классу ω_ℓ должна осуществляться по показателю с максимальным значением $\mu_\ell(S_j)$, например, по звену имеющему наилучшие показатели, то выбирается агрегатор типа

$$US_\ell = \max_j [\mu_\ell(S_j)]. \quad (3)$$

Если оценка уровня соответствия классу ω_ℓ осуществляется по той характеристике оперативной памяти, которое на момент регистрации имеет минимальное значение функции принадлежности, например, по самому слабому «звену», то выбирается агрегатор типа

$$US_\ell = \min_j [\mu_\ell(S_j)]. \quad (4)$$

Если эксперты считают, что характеристики оперативной памяти, включенные в интегральную оценку уровня соответствия классу ω_ℓ , вносят различный «вклад» в показатель US_ℓ , то рекомендуется использовать агрегатор типа

$$US_\ell = \frac{\sum_{j=1}^N \alpha_j \cdot \mu_\ell(S_j)}{\sum_{j=1}^N \alpha_j}, \quad (5)$$

где α_j – весовые коэффициенты, определяемые экспертами с учетом информативности показателей S_j и (или) типов решаемых задач.

3. Если эксперты принимают решение для повышения точности принятия решений использовать электрические характеристики биологически активных

точек (БАТ), то при оценке состояния ОП синтезируются модели вида

$$UB_{\ell} = \mu_{\ell}(ER_{II}), \quad (6)$$

где UB_{ℓ} – уверенность в том, что состояние ОП определяется как класс ω_{ℓ} по величине энергетического разбаланса ER_{II} БАТ, «связанных» с памятью (точки С3, С7). Для этих точек величину энергетического разбаланса рекомендуется определять по отклонению электрических сопротивлений БАТ от их номинальных значений δR_j :

$$ER_{II} = \frac{[\mu_{ЭР}(\delta R_{C3}) + \mu_{ЭР}(\delta R_{C7})]}{2},$$

где

$$\begin{aligned} \mu_{ЭР}(\delta R_{C3}) &= \\ &= \begin{cases} 0, & \text{если } \delta R_{C3} < 15\%, \\ 0,009\delta R_{C3} - 0,135, & \text{если } 15\% \leq \delta R_{C3} < 80\%, \\ 0,6, & \text{если } \delta R_{C3} \geq 80\%, \end{cases} \\ \mu_{ЭР}(\delta R_{C7}) &= \\ &= \begin{cases} 0, & \text{если } \delta R_{C7} < 15\%, \\ 0,018\delta R_{C7} - 0,27, & \text{если } 15\% \leq \delta R_{C7} < 70\%, \\ 1,0, & \text{если } \delta R_{C7} \geq 70\%. \end{cases} \end{aligned}$$

Если электрические характеристики БАТ используются для оценки таких факторов риска расстройств ОП, как психоэмоциональное перенапряжение и умственное переутомление, то энергетический разбаланс определяется для точек, «связанных» с этими функциональными состояниями. Если принимается решение использовать БАТ для оценки индивидуальных факторов риска от патологии других органов и систем, имеющих представительство на биологически

активных точках, решается задача синтеза гибридных нечетких решающих правил с использованием методов, описанных в работе [22, с. 375–401].

4. При синтезе решающих правил по данным с ПОВП следует иметь в виду, что получаемые значения информативных признаков отражают текущие (мгновенные) значения измеряемых свойств оперативной памяти и по этим значениям нельзя достоверно утверждать о наличии психоэмоционального перенапряжения, переутомления или о патологических процессах, происходящих в оперативной памяти. Для увеличения доверия к принимаемым решениям о длительно развивающихся процессах, в зависимости от медико-технологических возможностей, рекомендуется один из трех способов синтеза решающих правил.

Первый способ основан на слежении достаточно длительное время за показателями, характеризующими состояние ОП, для которых $\mu_{\ell}(S_j)$ больше выбранного экспертами порога. В этом варианте эксперты задают интервалы времени наблюдения ΔT_{sj} и количество этих интервалов m , определяющее общее время наблюдений. В конце каждого интервала времени с номером k производится измерение значений S_{jk} и далее вычисляется среднее значение анализируемого показателя:

$$S_{cj} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m S_{jk}.$$

Уточненные значения уверенностей в отнесении обследуемых к классу ω_ℓ определяются по функциям принадлежности, получаемым аналогично п. 2, в которых параметр S_j заменяется на соответствующее среднее значение S_{cj} с расчетом уверенности в ω_ℓ по усредненным значениям UWC_ℓ и аналогично US_ℓ с применением агрегирующих формул (2) – (5).

Второй способ основывается на введении временных поправочных функций $f_{\ell sj}(t)$, учитывающих, сколько времени «удерживается» исследуемый показатель S_j в классе состояний ω_ℓ . Уверенность $UWT_{\ell sj}$ в принимаемом решении по классу ω_ℓ для показателя S_j определяется выражением

$$UWT_{\ell sj} = \mu_{t\ell}(Z_\ell), \quad (7)$$

где $Z_\ell = \mu_\ell(S_j) \cdot f_{\ell sj}(t)$.

В другом варианте:

$$UWT_{\ell sj} = F_{UT}[\mu_\ell(S_j), f_{\ell sj}(t)], \quad (8)$$

где F_{UT} – функция агрегации, которая во многих практических применениях определяется накопительной модифицированной функцией Е. Шортлифа. Агрегация составляющих $UWT_{\ell sj}$ в интегральное решающее правило осуществляется аналогично (2) – (5).

Третий способ базируется на использовании нечетких таблиц, по строкам которых записываются выбранные экспертами интервалы ΔS_j или ΔS_{cj} , а

по столбцам – с нарастающим итогом интервалы времени нахождения исследуемых показателей в пределах выбранных интервалов. Элементами таблицы являются частные уверенности $UWT_{\ell sj}(p, q)$ (p, q – номера строк и столбцов матрицы) отнесения исследуемого объекта к классу ω_ℓ для выбранных интервалов значений параметров и времен. Если в течение времени наблюдения интервал ΔS_{cj} не изменяется, то уверенность $UWT_{\ell sj}$ в принимаемом решении по классу ω_ℓ для показателя S_j определяется выбранной из таблицы частной уверенностью:

$$UWT_{\ell sj} = UWT_{\ell sj}(p, q). \quad (9)$$

Если в течение времени наблюдения интервалы ΔS_{cj} изменяются, то для каждого интервала с учетом времени его «удержания» выбирается «своя» частная уверенность, которые агрегируются в соответствующее решающее правило вида

$$UWT_{\ell sj} = AG_{UTP}[UWT_{\ell sj}(p, q)], \quad (10)$$

где AG_{UTP} – агрегатор частных уверенностей по столбцам матрицы.

Если полученные оценки уверенностей для методик с идентификатором j используются для синтеза нечетких решающих правил интегральной оценки уверенности UW_ℓ в ω_ℓ по нескольким шкалам S_j , то соответствующие функции агрегации выбираются по тем же правилам, что и для моделей (2) – (5).

5. Если эксперты принимают решение для повышения точности принятия решений использовать функциональный резерв оперативной памяти и показателей, характеризующих её состояние, то реализуется следующая последовательность действий.

На экспертном уровне определяются время наблюдения T_H , которого, по мнению экспертов, достаточно для создания нагрузки, требуемой для оценки величины функционального резерва FR_j по показателю с идентификатором j , и количество тестовых последовательностей m , после реализации которых определяется числовая характеристика S_j , которая, по мнению экспертов, характеризует функциональное состояние FS_{Oj} до нагрузки. Первые пять тестовых последовательностей считаются тренировочными и в расчет не берутся.

Предъявление шестой тестовой последовательности начинает отсчет времени наблюдения T_H . По последующим m тестовым последовательностям определяют величину первого измерения S_j , далее поочередно убирается один начальный результат измерений и добавляется один последующий результат (скольжение вдоль результатов измерений на единицу). Получаем последовательные цепочки чисел, последнее из которых по истечении времени T_H определяется как функциональное состояние FS_{Hj} после нагрузки.

Функциональный резерв FR_j определяется по двум показателям: отношением ON_j уровня ФС до воздействия нагрузкой и после воздействия и скоростного VV_j восстановления уровня ФС:

$$ON_j = \frac{FS_{Oj}}{FS_{Hj}},$$

$$VV_j = \frac{(FS_{Oj} - FS_{Hj})}{T_H}.$$

По показателям ON_j и VV_j определяются частные функции уровня функционального резерва $f_j(ON_j)$ и $f_j(VV_j)$, по которым рассчитывается функциональный резерв FR_j выбранного показателя с идентификатором j :

$$FR_j = AG_{FRj} [f_j(ON_j), f_j(VV_j)], \quad (11)$$

где AG_{FRj} – функция агрегации для функционального резерва показателя с идентификатором j .

Функциональный резерв всей ОП определяется агрегацией соответствующих составляющих:

$$FR_{ОП} = AGFR_j (FR_j), \quad (12)$$

где $AGFR_j$ – функция агрегации для всех составляющих функционального резерва ОП.

Переход от показателей, характеризующих уровень функционального резерва ОП к оценке уверенности, в том, что исследуемые показатели или оперативная память в целом находятся в состоянии ω_ℓ , осуществляются через

соответствующие функции принадлежности и их агрегацию:

$$UWF_{\ell j} = \mu_{\ell}(FR_j), \quad (13)$$

$$UWF_{\ell} = AG_{WF}(UWF_{\ell j}), \quad (14)$$

где $UWF_{\ell j}$ – уверенность в ω_{ℓ} по уровню функционального резерва для показателя S_j ; UWF_{ℓ} – уверенность в ω_{ℓ} по уровню функционального резерва всей ОП; AG_{WF} – функция агрегации для составляющих с идентификаторами j .

6. При наличии медико-технологических возможностей формируются индивидуальные, экологические и эргономические факторы риска, для которых в соответствии с рекомендациями МСГНРП синтезируются частные решающие правила появления риска появления и развития нарушений функций оперативной памяти.

7. Частные решающие правила, полученные в пунктах 3–6, проверяются на информативность относительно анализируемых классов состояний ω_{ℓ} , и по выбранным информативным показателям с использованием общих рекомендаций МСГНРП осуществляется синтез искомых решающих правил следующего вида:

$$\text{ЕСЛИ}(UFOP_{\Pi} < UFOP_{\Pi}^{\Pi}) \text{ТО}(R = \text{БП}), \quad (15)$$

$$\begin{aligned} &\text{ЕСЛИ}[(UFOP_{\Pi} \geq UFOP_{\Pi}^{\Pi}) \text{И} \\ &(FR_{\Pi}^{\Pi} \leq FR_{\text{ОП}} < FR_{\text{БП}}^{\Pi})] \text{ТО}(R = \Pi), \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{ЕСЛИ}[(UFOP_{\Pi} \geq UFOP_{\Pi}^{\Pi}) \text{И} \\ &(FR_{\text{РД}}^{\Pi} \leq FR_{\text{ОП}} < FR_{\Pi}^{\Pi})] \text{ТО}(R = \text{РД}), \quad (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{ЕСЛИ}[(UFOP_{\Pi} \geq UFOP_{\Pi}^{\Pi}) \text{И} \\ &(FD_{\text{ОП}} \geq FR_{\text{РД}}^{\Pi})] \text{ТО}(R = \text{ДО}), \quad (18) \end{aligned}$$

где $UFOP_{\Pi}$ – уверенность в появлении и развитии расстройств оперативной памяти; $UFOP_{\Pi}^{\Pi}$ – порог принятия решений по показателям $UFOP_{\Pi}$; R – принимаемое решение с уверенностью $UFOP_{\Pi}$; БП – без патологии; П – прогноз; РД – ранняя стадия заболевания; ДО – направить на дообследование; $FR_{\text{БП}}^{\Pi}$, FR_{Π}^{Π} , $FR_{\text{РД}}^{\Pi}$ – пороги функционального резерва для классов БП, П и РД соответственно.

Результаты и их обсуждение

С использованием предложенного метода решалась задача прогнозирования появления и развития нарушений в работе оперативной памяти у операторов ЭВМ. При этом учитывалось, что наилучшее качество принимаемых решений обеспечивается, если в решающих правилах прогнозирования будут использованы информативные признаки, описывающие эргономику рабочих мест, экологическую компоненту, присутствующую в окружении обследуемых, индивидуальные факторы риска и индивидуальные особенности организма.

При получении частных моделей оценки риска появления и развития расстройств оперативной памяти мы исходили из того, что развитие расстройств функций оперативной памяти носит индивидуальный характер. У ряда операторов информационно-насыщенных систем одних и тех же профессий нарушений не только не наблюдается за все время операторской деятельности, а в ряде случаев наблюдается улучшение характеристик работы отдельных или даже всех блоков ОП. В то же время у определенного контингента операторов с течением времени наблюдается ухудшение исследуемых показателей вплоть до развития патологического процесса. Проведенные нами исследования показали, что при всех описанных вариантах развития событий ПОВП является достаточно надежным индикатором оценки текущего состояния блоков ОП.

Учитывая, что на выбранные для оценки состояния ОП показатели оказывают влияние различные факторы (по крайней мере, ПЭН, утомление, патология ОП) при решении задач прогнозирования патологии ОП, аналогично задачам прогнозирования патологии когнитивной функции внимания, будем придерживаться следующей тактики. На первом этапе исследований решалась задача получения функций принадлежности к классам нормы ω_H и отклонения от нормы ω_O $\mu_H(S)$ и $\mu_O(S)$ по шкалам

параметров, характеризующих состояние памяти, первичное классификационное решение. Вычисление значений $\mu_H(S)$ позволяет реализовывать следующую классификационную схему. Если для всех S_j $\mu_H(S_j) = 1$, то принимается решение о нормальном состоянии всех блоков ОП и решение заканчивается. В противном случае решается задача предварительной оценки возможных причин отклонения от нормы, для чего доступными методами устанавливаются возможные варианты измененных функциональных состояний ПЭН, утомление, стресс, монотония, активация и др.

При установлении отсутствия измененных функциональных состояний для тех S_j , для которых $\mu_H(S_j) < 1$, решаются задачи отнесения обследуемого к такому возможному набору классов, как: риск появления и развития расстройств блоков ОП (ω_P), легкое когнитивное нарушение (ω_L); умеренное когнитивное нарушение (ω_Y), начальная клиническая стадия (ω_K).

С учетом того, что методика полного воспроизведения по данным работы [18] нагружает все блоки ОП, в данной работе для прогнозирования состояний исследуемой когнитивной функции выбрана эта методика. Для неё определена соответствующая функция принадлежности:

$$\mu_H(\text{ПВВ}) = \begin{cases} 1, & \text{если ПВВ} < 1000, \\ 1 - 0,000008(\text{ПВВ} - 1000)^2, & \text{если } 1000 \leq \text{ПВВ} < 1250, \\ 0,000008(\text{ПВВ} - 1500)^2, & \text{если } 1250 \leq \text{ПВВ} < 1500, \\ 0, & \text{если ПВВ} \geq 1500. \end{cases}$$

Для повышения надежности принимаемых решений, в качестве прогностического решающего правила была выбрана модель (8).

Ориентиром для выбора формы и параметров функций принадлежности

$\mu_\ell(S_j) = \mu_\Pi(S_j)$ для модели (8) послужили гистограммы распределения классов (ω_H) , (ω_Π) и (ω_L) , полученные в ходе разведочного анализа на шкале ПВВ (рис. 1).

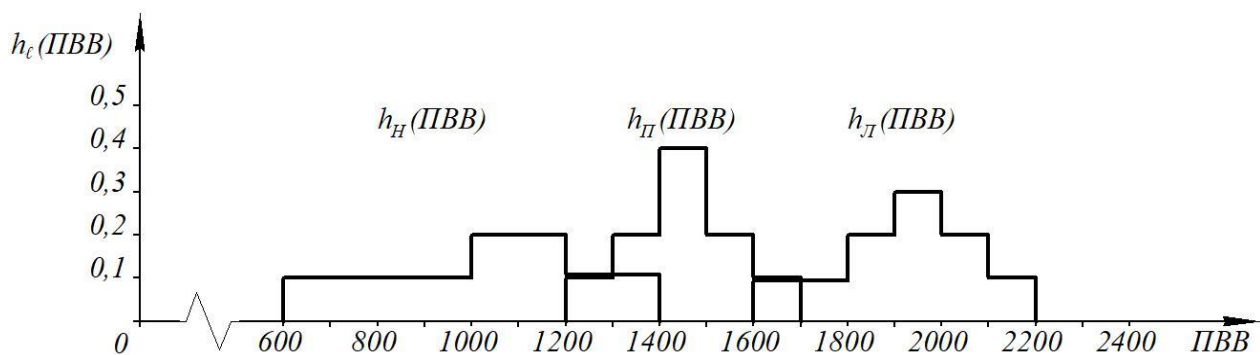


Рис. 1. Гистограммы распределения классов (ω_H) , (ω_Π) , и (ω_L) на шкале ПВВ

Fig. 1. Histograms of the distribution of classes (ω_H) , (ω_Π) , and (ω_L) , and on the FP scale

Анализ полученных гистограмм позволил экспертам построить обобщенные графики функций принадлежности

к классам (ω_H) , (ω_Π) и (ω_L) , параметры которых определяются используемой базовой переменной (рис. 2).

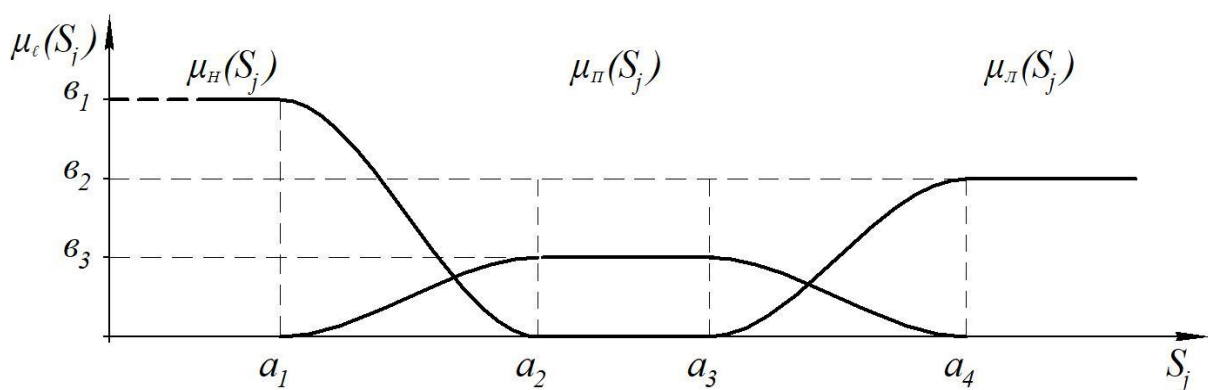


Рис. 2. Обобщенные графики функций принадлежности к классам (ω_H) , (ω_Π) , и (ω_L) с базовыми переменными S_j

Fig. 2. Generalized graphs of class membership functions (ω_H) , (ω_Π) , and (ω_L) , with basic variables S_j

Для базовой переменной ПВВ к классу риск появления и развития расстройств блоков ОП (ω_{Π}) соответству-

ющая функция принадлежности имеет вид

$$\mu_{\Pi}(\text{ПВВ}) = \begin{cases} 0, & \text{если } \text{ПВВ} \leq 1200, \\ 0,0000133(\text{ПВВ} - 1200)^2, & \text{если } 1200 \leq \text{ПВВ} < 1350, \\ 0,6 - 0,0000133(\text{ПВВ} - 1200)^2, & \text{если } 1350 \leq \text{ПВВ} < 1500, \\ 0,6, & \text{если } 1500 \leq \text{ПВВ} < 1600, \\ 0,6 - 0,0000133(\text{ПВВ} - 1600)^2, & \text{если } 1600 \leq \text{ПВВ} < 1750, \\ 0,0000133(\text{ПВВ} - 1900)^2, & \text{если } 1750 \leq \text{ПВВ} < 1900, \\ 0, & \text{если } \text{ПВВ} \geq 1900. \end{cases}$$

Для операторов ЭВМ экспертами получен график временных поправочных функций, описываемый выражением:

$$f_{\Pi S_j}(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t \leq 3, \\ 0,028(t-3)^2, & \text{если } 3 \leq t < 6,5, \\ 0,7 - 0,028(t-10), & \text{если } 6,5 \leq S_j < 10, \\ 0,7, & \text{если } t \geq 10. \end{cases}$$

Уверенность в том, что со временем у обследуемого появится расстройство функций памяти по показателю S_j , определяется по формуле

$$UW_{\text{ПВВ}} = \mu_{\Pi}(\text{ПВВ}) + f_{\Pi S_j}(t) - \mu_{\Pi}(\text{ПВВ}) \cdot f_{\Pi S_j}(t). \quad (19)$$

Уверенность в том, что со временем у обследуемого появится расстройство функций памяти $UWTP$ по показателю ПВВ, определяется по формуле

$$UWTP = UW_{\text{ПВВ}}. \quad (20)$$

По эргономическим факторам риска (уровень хронического психоэмоцио-

нального напряжения YP_D и умственного переутомления YU_D) эксперты решили использовать те же модели, что и в прогностических моделях для когнитивной функции внимания [19, с. 86; 20, с. 28; 21, с. 6; 22 с. 185]. В этих работах уверенность в классе ω_{Π} по эргономическим факторам риска определяется выражением

$$UEP = \mu_{\Pi}(YP_D) + \mu_{\Pi}(YU_D) - \mu_{\Pi}(YP_D) \cdot \mu_{\Pi}(YU_D), \quad (21)$$

где

$$\mu_{\Pi}(YP_D) = \begin{cases} 0, & \text{если } YP_D < 0,2, \\ YP_D - 0,2, & \text{если } 0,2 \leq YP_D < 0,6, \\ 0,4, & \text{если } YP_D \geq 0,6; \end{cases}$$

$$\mu_{\Pi}(YU_D) = \begin{cases} 0, & \text{если } YU_D < 0,3, \\ YU_D - 0,15, & \text{если } 0,3 \leq YU_D < 0,8, \\ 0,25, & \text{если } YU_D \geq 0,8. \end{cases}$$

По блоку признаков, характеризующих индивидуальные факторы риска

(образ жизни и индивидуальное состояние здоровья), с учетом рекомендаций [22], уверенность в классе ω_{Π} UIP определяется соответствующей функцией принадлежности:

$$UIP = \mu_{\Pi}(B), \quad (22)$$

где

$$\mu_{\Pi}(B) = \begin{cases} 0, & \text{если } B = 1, \\ 0,022(B-1)^2, & \text{если } 1 < B \leq 4, \\ 0,4 - 0,022(B-7)^2, & \text{если } 4 < B \leq 7, \\ 0,4, & \text{если } B > 7. \end{cases}$$

Базовая переменная определяется как сумма двоичных переменных опросника индивидуальных факторов риска, сформированного следующим образом:

- стрессы вне работы (b_1);
- умственное перенапряжение, не связанное с операторской деятельностью (b_2);
- эмоциональное перенапряжение, не связанное с операторской деятельностью (b_3);
- депрессии, связанные с психологическим климатом вне работы (b_4);
- несбалансированное питание (b_5);
- хронические недосыпы (b_6);
- авитаминоз, в частности дефицит витамина В-12 (b_7);
- соматические нарушения, влияющие на состояние памяти (b_8);
- алкогольная и наркотическая зависимость (b_9);
- злоупотребление вредной пищей, содержащей большое количество красителей, особенно с алюминием (b_{10});

– злоупотребление кофеиносодержащими напитками (b_{11});

– психические расстройства, такие как шизофрения или эпилепсия (b_{12});

– умственная отсталость, вызванная вследствие тяжелой беременности, родов и наследственностью (b_{13});

– употребление препаратов, имеющих побочные действия в виде когнитивных расстройств (транквилизаторы, седативные и антигистаминные препараты, нейролептики, антидепрессанты и др.) (b_{14});

– черепно-мозговые травмы (b_{15}).

Переменная b_i определяется как двоичная переменная: $b_i = 1$ при наличии i -го фактора риска; $b_i = 0$ – при его отсутствии. Базовая переменная B функции принадлежности для формулы (22) определяется выражением

$$B = \sum_{i=1}^{15} b_i.$$

Дополнительным достаточно надежным индикатором оценки влияния операторской деятельности на состояние ОП является энергетический разбаланс БАТ, связанных с памятью (пункт 3 предлагаемого метода). Для этой группы признаков получена функция принадлежности к лингвистической переменной «высокий риск появления и развития нарушений функции памяти» по величине энергетического разбаланса БАТ, которая определяет дополнительную частную уверенность в прогнозе появления и развития нарушений функций памяти (UPP):

$$UPP = \mu_{\Pi\Pi}(ER_{\Pi}), \quad (23)$$

где

$$\mu_{\Pi\Pi}(ER_{\Pi}) = \begin{cases} 0, & \text{если } ER_{\Pi} < 0,1, \\ 4,8(ER_{\Pi} - 0,1)^2, & \text{если } 0,1 \leq ER_{\Pi} < 0,35, \\ 0,6 - 4,8(ER_{\Pi} - 0,6)^2, & \text{если } 0,35 \leq ER_{\Pi} < 0,6, \\ 0,6, & \text{если } ER_{\Pi} \geq 0,6. \end{cases}$$

Полученные частные модели с учетом общих рекомендаций МСГНРП агрегируются в финальную модель оценки уверенности в появлении и развития и расстройств блоков ОП:

$$UW_{\Pi}(q+1) = UW_{\Pi}(q) + Q_{q+1}[1 - UW_{\Pi}(q)]. \quad (24)$$

где $UW_{\Pi}(1) = Q_1 = UWTP$; $Q_2 = UEP$; $Q_3 = UIP$; $Q_4 = UPP$.

Экспертная оценка полученного решающего правила, проводимая по методике, описанной в работах [22, с. 401; 24, с. 91], показала уровень доверия к модели (24) на уровне 0,89. В ходе математического моделирования, проводимого по исходным данным, сформированным экспертами, была получена уверенность на уровне 0,91, что является хорошим результатом для задач прогнозирования с нечетким представлением данных.

Аналогично была получена модель диагностики ранних стадий нарушений

оперативной памяти у операторов информационно насыщенных систем, отличающаяся использованием в качестве блоков информативных признаков показателей, характеризующих состояние различных элементов оперативной памяти, эргономические и индивидуальные факторы риска, величину функционального резерва ОП и энергетический разбаланс БАТ, позволяющая получать уверенность в правильном принятии решения не хуже 0,95.

Выводы

В ходе проведенных исследований было показано, что для улучшения показателей качества прогнозирования и диагностики состояний оперативной памяти и её блоков при синтезе соответствующих решающих правил следует учитывать показатели, характеризующие состояние блоков оперативной памяти, энергетический разбаланс БАТ, эргономические и индивидуальные факторы риска. При таком подходе в задачах прогнозирования достигается уверенность в правильном принятии решения не хуже 0,85. В задачах диагностики ранних стадий нарушений оперативной памяти у операторов информационно насыщенных систем уверенность в правильном принятии решения превышает величину 0,95.

Список литературы

1. Рябова М. А. Показатели психофизиологического состояния и когнитивных функций у жителей-северян пожилого возраста // Приложение международного

научного журнала «Вестник психофизиологии». 2022. № 4. С. 99–102. <https://doi.org/10.34985/o6320-0588-8573-y>

2. 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>

3. Контроль когнитивных функций методами спектрофотометрии и вызванных потенциалов / Л. П. Сафонова, А. Н. Дмитриев, В. С. Ширяева, Д. Ю. Кулешов // Биомедицинская радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 6. С. 5–17. <https://doi.org/10.18127/j15604136-202206-01>

4. Макаренко Н., Барчукова Г. В. Влияние когнитивных способностей на уровень технико-тактического мастерства спортсменов, занимающихся настольным теннисом // Спортивно-педагогическое образование. 2022. № 3. С. 38–43.

5. 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.

6. Ахапкин Р. В., Файзуллоев А. З. Структура когнитивных нарушений у больных с непсихотическими депрессивными расстройствами // Кремлевская медицина. Клинический вестник. 2020. № 3. С. 54–64.

7. Воздействие физических упражнений на когнитивные способности студентов / Н. Е. Курочкина, Д. Е. Борисова, Т. И. Олейникова, А. Е. Гришина, Е. В. Кожина // OlymPlus. Гуманитарная версия. 2021. № 2 (13). С. 43–46.

8. Послеоперационные когнитивные нарушения: этиология, клинические проявления, подходы к диагностике / С. П. Бордовский, П. М. Крупенин, А. И. Розен [и др.] // Медицинский совет. 2021. № 19. С. 49–56.

9. Структура страхов у лиц пожилого возраста с умеренными когнитивными нарушениями / Т. Н. Резникова, Н. А. Селиверстова, Е. В. Савельев, Д. А. Федоряка // Психическое здоровье. 2019. № 1. С. 17–22. <https://doi.org/10.25557/2074-014X.2019.01.17-22>

10. Суханов А. В., Семаев С. Е., Максимов В. Н. Ассоциации отдельных параметров оперативной памяти с генотипами СОМТ в Западной Сибири // Медицинская генетика. 2019. Т. 18, № 6 (204). С. 43–49. <https://doi.org/10.25557/2073-7998.2019.06.43-49>

11. Изменения коннективности головного мозга у больных с нарушениями вербальной оперативной памяти при дисциркуляторной энцефалопатии / В. Ф. Фокин, Н. В. Пономарева, Р. Н. Коновалов [и др.] // Вестник Российского государственного медицинского университета. 2019. № 5. С. 56–62. <https://doi.org/10.24075/vrgmu.2019.061>

12. Влияние сертралина на когнитивные, психомоторные и личностно-поведенческие показатели при терапии депрессии (клинический случай) / Т. И. Вазагаева,

Р. В. Ахапкин, А. О. Корендюхина [и др.] // Медицинский совет. 2019. № 21. С. 103–109. <https://doi.org/10.21518/2079-701X-2019-21-103-109>

13. Объем краткосрочной памяти у пациентов в позднем восстановительном периоде ишемического инсульта / А. А. Кузюкова, А. П. Рачин, О. И. Одарущенко [и др.] // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2021. Т. 98, № 3-2. С. 104–105. <https://doi.org/10.17116/kurort20219803221>

14. Ломов Б. Ф. Основные проблемы инженерной психологии // Институт психологии Российской академии наук. Организационная психология и психология труда. 2022. Т. 7, № 1. С. 226–262.

15. 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>

16. Фешин Б. Н. Оператор-диспетчер в интегрированных системах управления. Информационно-психологическая подготовка // Автоматика. Информатика. 2020. № 2. С. 31–35.

17. Перспективные немедикаментозные технологии оптимизации психофизиологических качеств и работоспособности операторов / А. Ю. Ерошенко, С. М. Грошинин, С. Э. Бугаян, Л. Г. Анистратенко // Морская медицина. 2019. Т. 5, № 2. С. 55–62. <https://doi.org/10.22328/2413-5747-2019-5-2-55-62>

18. Шуткин А. Н. Прогнозирование и ранняя диагностика заболеваний, провоцируемых длительными умственными нагрузками // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2016. Т. 15, № 2. С. 320–325.

19. 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>

20. An expert system for assessment of the state of cognitive functions using a fuzzy hybrid knowledge base / N. A. Korenevskiy, S. N. Rodionova, V. V. Aksenov, N. L. Korzhuk // Biomedical Engineering. 2021. Vol. 55, N 4. P. 263–268.

21. Prediction of operators cognitive degradation and impairment using hybrid fuzzy modelling / N. A. Korenevskiy, Riad Taha Al-Kasasbeh, Fawaz Al-Shawawreh, Tareq Ahram, S. N. Rodionova, Mahdi Salman, S. A. Filist, M. Namazov, Shaqadan Ashraf, M. Ilyash // Theoretical Issues in Ergonomics Science. 2022. Vol. 24, N 4. P. 1–26. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2022.2086645>

22. Оценка и управление состоянием здоровья обучающихся на основе гибридных интеллектуальных технологий: монография / Н. А. Корневский, А. Н. Шуткин, С. А. Горбатенко, В. И. Серебровский. Старый Оскол: ТНТ, 2020. 472 с.

23. 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.

24. 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. 2023. № 3. С. 80–96. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-80-96>

References

1. Ryabova M.A. Indicators of psychophysiological state and cognitive functions in elderly northern residents. *Prilozhenie mezhdunarodnogo nauchnogo zhurnala «Vestnik psikhofiziologii» = Appendix of the International Scientific Journal «Bulletin of Psychophysiology»*. 2022;(4):99–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.34985/o6320-0588-8573-y>

2. Mezentsev Y.A., Razumnikova O.M., Pavlov P.S., Tarasova I.V., Trubnikova O.A. Application of discrete optimization tools for the classification of cognitive deficits: features of the use of 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>

3. Safonova L.P., Dmitriev A.N., Shiryayeva V.S., Kuleshov D.Y. Monitoring cognitive functions using spectrophotometry and evoked potentials. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*. 2022;25(6):5–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.18127/j15604136-202206-01>

4. Makarenko N., Barchukova G.V. The influence of cognitive abilities on the level of technical and tactical mastery of table tennis athletes. *Sportivno-pedagogicheskoe obrazovanie = Sports and Pedagogical Education*. 2022;(3):38–43. (In Russ.)

5. Treshchinskaya M.A., Mishiev V.D., Sulii L.N., Globa M.V. Cognitive disorders in patients with mental work with chronic cerebral ischemia, their professional maladjustment and burnout. *Psikhiatriya, psikhoterapiya i klinicheskaya psikhologiya = Psychiatry, Psychotherapy and Clinical Psychology*. 2019;10(2):241–250. (In Russ.)

6. Akhapkin R.V., Faizulloev A.Z. The structure of cognitive impairment in patients with non-psychotic depressive disorders. *Kremlevskaya meditsina. Klinicheskii vestnik = Psychiatry, Psychotherapy and Clinical Psychology*. 2020;(3):54–64. (In Russ.)

7. Kurochkina N.E. Borisova D.E., Oleynikova T.I., Grishina A.E., Kozhina E.V. The effects of physical exercise on students' cognitive abilities. *OlymPlus. Gumanitarnaya versiya = OlymPlus. Humanitarian Version*. 2021;(2):43–46. (In Russ.)

8. Bordovsky S.P., Krupenin P.M., Rosen A.I., et. al. Postoperative cognitive impairment: etiology, clinical manifestations, approaches to diagnosis. *Meditsinskii sovet = Medical Council*. 2021;(19):49–56. (In Russ.)
9. Reznikova T.N., Seliverstova N.A., Savel'ev E.V., Fedoryaka D.A. The structure of fears in elderly people with moderate cognitive impairment. *Psikhicheskoe zdorov'e = Mental Health*. 2019;(1):17–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.25557/2074-014X.2019.01.17-22>
10. Sukhanov A.V., Semaev S.E., Maksimov V.N. Associations of individual parameters of working memory with COMT genotypes in Western Siberia. *Meditsinskaya genetika = Medical Genetics*. 2019;18(6):43–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.25557/2073-7998.2019.06.43-49>
11. Fokin V.F., Ponomareva N.V., Konovalov R.N., et al. Changes in brain connectivity in patients with impaired verbal working memory in dyscirculatory encephalopathy. *Vestnik Rossiiskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta = Bulletin of Russian State Medical University*. 2019;(5):56–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.24075/vrgmu.2019.061>
12. Vazagaeva T.I., Akhapkin R.V., Korendyukhina A.O., et al. The effect of sertraline on cognitive, psychomotor and personal-behavioral indicators in the treatment of depression (clinical case). *Meditsinskii sovet = Medical Council*. 2019;(21):103–109. (In Russ.) <https://doi.org/10.21518/2079-701X-2019-21-103-109>
13. Kuzyukova A.A., Rachin A.P., Odarushchenko O.I., et al. The volume of short-term memory in patients in the late recovery period of ischemic stroke. *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoi fizicheskoi kul'tury = Problems of Balneology, Physiotherapy and Exercise Therapy*. 2021;98(3-2):104–105 (In Russ.) <https://doi.org/10.17116/kurort20219803221>
14. Lomov B.F. Basic problems of engineering psychology. *Institut psikhologii Rossiiskoi akademii nauk. Organizatsionnaya psikhologiya i psikhologiya truda = Institute of Psychology Russian Academy of Sciences. Organizational Psychology and Labor Psychology*. 2022;7(1):226–262. (In Russ.)
15. Brumshtein Y.M., Molimonov D.A. Mathematical models and methods for solving problems of information support, management and assessment of the quality of work of operators in complex human-machine systems. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2019;(3):73–89. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2019-3-73-89>
16. Feshin B.N. Operator-dispatcher in integrated control systems. Information and psychological preparation. *Avtomatika. Informatika = Automation. Computer Science*. 2020;(2):31–35. (In Russ.)
17. Eroshenko A.Y., Groshilin S.M., Bugayan S.E., Anistratenko L.G. Promising non-drug technologies for optimizing the psychophysiological qualities and performance of operators. *Morskaya meditsina = Marine Medicine*. 2019;5(2):55–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.22328/2413-5747-2019-5-2-55-62>

18. Shutkin A. N. Prediction and early diagnosis of diseases caused by long-term mental stress. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2016;15(2):320–325. (In Russ.)
19. Korenevskii 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. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biotekhnicheskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biotechnical Systems*. 2019;18(4):85–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.18.4.011>
20. Korenevskiy N.A., Rodionova S.N., Aksenov V.V., Korzhuk N.L. An expert system for assessment of the state of cognitive functions using a fuzzy hybrid knowledge base. *Biomedical Engineering*. 2021;55(4):263–268.
21. Korenevskiy N. A., Riad Taha Al-Kasasbeh, Fawaz Al-Shawawreh, Tareq Ahram, Rodionova S. N., Mahdi Salman, Filist S. A., Namazov M., Shaqadan Ashraf, Ilyash M. Prediction of operators cognitive degradation and impairment using hybrid fuzzy modelling. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 2022;24(4):1–26. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2022.2086645>
22. Korenevskii N.A., Shutkin A.N., Gorbatenko S.A., Serebrovskii V.I. Assessment and management of the health status of students based on hybrid intelligent technologies. *Saryi Oskol: TNT*; 2020. 472 p. (In Russ.)
23. Korenevskii N.A., Rodionova S.N., Khripina I.I. Methodology for the synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems. *Saryi Oskol: TNT*; 2019. 472 p. (In Russ.).
24. Korenevskii N.A., Aksenov V.V., Rodionova S.N., Gontarev S.N., Lazurina L.P., Safonov R.I. Method for a comprehensive assessment of the level of information content of classification features in conditions of a fuzzy data structure. *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;(3):80–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-80-96>

Информация об авторах / Information about the Authors

Кореневский Николай Алексеевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры биомедицинской
инженерии, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru,
ResearcherID: F-8112-2013,
ORCID: 0000-0003-2048-0956,
Scopus ID: 24471633500

Nikolay A. Korenevsky, Doctor of Sciences
(Engineering), Professor, Professor
of the Department of Biomedical Sciences,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru,
ResearcherID: F-8112-2013,
ORCID: 0000-0003-2048-0956,
Scopus ID: 24471633500

Рыбаков Антон Юрьевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

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, Scopus ID: 57195455825, WOS ID: Q-1060-2017

Разумова Ксения Викторовна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: myelectronworld@mail.ru, ORCID: 0009-0007-7942-8083

Anton Y. Rybakov, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Sofia 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, WOS ID: Q-1060-2017, Scopus ID: 57195455825

Ksenia V. Razumova, Candidate of Sciences (Engineering), Senior Lecturer of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: myelectronworld@mail.ru, ORCID: 0009-0007-7942-8083

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-181-193>

УДК 004.451

Моделирование интерпретатора функционального языка программирования с возможностями метапрограммирования

А. А. Чаплыгин¹ ✉¹ Юго-Западный государственный университет

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

✉ e-mail: alex_chaplygin@mail.ru

Резюме

Цель исследований заключается в моделировании интерпретатора функционального языка программирования с возможностями метапрограммирования и анализе способов реализации примитивных операторов на основе макросов.

Методы. Была разработана формальная модель интерпретатора функционального языка, являющегося подмножеством Common Lisp, с денотационной семантикой, которая позволяет точно описать поведение интерпретатора при вычислении элементов языка, таких как цитирование, обращение к переменным, последовательность действий, ветвление, присваивание, абстракция, аппликация.

Результаты. На основе денотационной семантики был разработана архитектура интерпретатора функционального языка с возможностями метапрограммирования. В качестве базовых типов объектов были выбраны числа, символы, пары, строки и массивы. Для хранения объектов была использована теговая архитектура, где младшие биты адреса объекта всегда равны нулю, поэтому в них можно хранить код типа объекта и бит для пометки. Выделение и освобождение объектов происходит автоматически: для сборки мусора использован алгоритм пометки и очистки. С помощью макросов были реализованы операторы ветвления – полные и неполные, оператор выбора, операторы блока связанных переменных.

Заключение. В результате работы был реализован интерпретатор функционального языка с возможностями метапрограммирования. С помощью макросов были реализованы примитивные операторы условия, выбора, блока связанных переменных. На примере этих операторов показано, что, используя метапрограммирование, можно встраивать в интерпретатор только базовые формы и примитивы, а остальные операторы могут быть реализованы с помощью метапрограммирования, что позволяет упростить и сократить объем программного кода интерпретатора.

Ключевые слова: интерпретатор; Common Lisp; денотационная семантика; метапрограммирование; макрос.

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

Для цитирования: Чаплыгин А. А. Моделирование интерпретатора функционального языка программирования с возможностями метапрограммирования // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 2. С. 181–193. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-181-193>

Поступила в редакцию 18.04.2024

Подписана в печать 16.05.2024

Опубликована 28.06.2024

© Чаплыгин А. А., 2024

Modeling of functional language interpreter with metaprogramming

Aleksandr A. Chaplygin¹ ✉

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

✉ e-mail: alex_chaplygin@mail.ru

Abstract

The purpose of the research consists of modeling an interpreter for a functional programming language with metaprogramming capabilities and analyzing ways to implement primitive operators based on macros.

Methods. A formal model of a functional language interpreter, which is a subset of Common Lisp, was developed with denotational semantics, which allows you to accurately describe the behavior of the interpreter when calculating language elements such as quoting, accessing variables, sequence of actions, branching, assignment, abstraction, application.

Results. Based on denotational semantics, the architecture of a functional language interpreter with metaprogramming capabilities was developed. Numbers, symbols, pairs, strings and arrays were chosen as the basic types of objects. To store objects, a tag architecture was used, where the low-order bits of the object address are always zero, so they can store the object type code and the tag bit. Objects are allocated and freed automatically: a mark and cleanup algorithm is used for garbage collection. Using macros, branching operators, complete and incomplete, selection operator, and block operators of related variables were implemented.

Conclusion. As a result of the work, a functional language interpreter with metaprogramming capabilities was implemented. Using macros, primitive operators of condition, selection, and a block of related variables were implemented. Using these operators as an example, it is shown that using metaprogramming, only basic forms and primitives can be built into the interpreter, and the other operators can be implemented using metaprogramming, which makes it possible to simplify and reduce the amount of interpreter code.

Keywords: interpreter; Common Lisp; denotational semantics; metaprogramming; macro.

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

For citation: Chaplygin A. A. Modeling of functional language interpreter with metaprogramming. *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;14(2):181–193. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-181-193>

Received 18.04.2024

Accepted 16.05.2024

Published 28.06.2024

Введение

Функциональные языки программирования представляют процесс вычислений как вычисление функции в математике [1; 2; 3; 4]. Входные данные – это аргументы функции, выходные данные – значение функции. Главная функция

может зависеть от других функций. В отличие от императивного программирования в функциональном программировании предполагается отсутствие состояния, которое хранится в явном виде (например, в памяти). Также не предполагается изменение этого состояния. Достоинством такого подхода является

отсутствие скрытых побочных эффектов [3; 5; 6], т. е. скрытых зависимостей одного вычисления от другого, в результате чего получаются так называемые чистые функции. При одних и тех же входных значениях чистая функция без побочных эффектов будет всегда возвращать одно и то же значение. Это значение можно кешировать для последующего использования. Также можно менять порядок вызова функций или выполнять их параллельно [7; 6].

Лисп является одним из первых языков программирования вообще и первым функциональным языком программирования [8; 9; 10]. Хотя на нем можно было программировать в функциональном стиле, для практической реализации систем программирования были включены возможности менять состояние программы (глобальное окружение), а также возможности управления потоком вычислений [11].

Реализовать систему программирования можно с помощью интерпретатора или компилятора. Оба способа имеют свои достоинства и недостатки [12; 13; 14]. Интерпретатор языка по сложности гораздо менее сложный, чем компилятор. Например, метациклический интерпретатор Лиспа занимает одну страницу текста [15]. С помощью интерпретатора появляется возможность реализовать интерактивный цикл разработки REPL (Read, Eval, Print Loop), в результате чего можно интерактивно тестировать отдельные функции программы, смотреть состояния

переменных. Недостатком интерпретатора является медленная скорость работы по сравнению с компилятором, хотя существуют методы повышения скорости интерпретаторов, такие как предварительная трансляция в байт-код.

Компиляторы за счет многочисленных оптимизаций могут обеспечить высокую скорость работы программы [13; 16; 17], но это требует больших усилий при разработке и тестировании [18]. Также для систем компиляторов невозможна реализация интерактивной консоли разработки, потому что для работы программы требуется полная компиляция всех частей программы, никакая функция программы не может работать по отдельности.

Как было сказано в [19], метапрограммирование способно очень сильно упростить разработку крупных систем. Для поддержки метапрограммирования в систему интерпретатора необходимо добавить возможность создания макروفункций и возможность макроподстановки. Квазичитирование обеспечивает контроль над абстрактными синтаксическими деревьями макروفункций.

Материалы и методы

В качестве исходного языка возьмем язык, являющийся подмножеством языка Common Lisp. Исходный язык представляется следующей системой грамматик:

$$\begin{aligned} \langle O \rangle &::= \langle A \rangle \mid \langle Q \rangle \\ \langle A \rangle &::= \langle \text{symbol} \rangle \mid \langle \text{number} \rangle \\ \langle Q \rangle &::= ' \langle S \rangle \mid \langle S \rangle \\ \langle S \rangle &::= \langle A \rangle \mid (\langle S \rangle *) \end{aligned} \quad (1)$$

где $\langle O \rangle$ – вычисляемый объект; $\langle A \rangle$ – атом, который может быть или символом или числом; $\langle Q \rangle$ – выражение с цитированием или без него; $\langle S \rangle$ – списочное выражение или атом.

Для формализации интерпретатора функционального языка воспользуемся денотационной семантикой [20]. Определим математический эквивалент всех конструкций языка. Исходная программа преобразуется в функцию, которая будет являться денотацией программы. Для функциональных языков в качестве базового множества функций традиционно используется λ -исчисление.

Основу интерпретатора составляет функция $\mathcal{E}$. Она имеет следующий тип:

$$\mathcal{E} : \pi \times \rho \times \kappa \rightarrow \varepsilon, \quad (2)$$

где π – исходная программа; ρ – окружение; κ – продолжение; ε – значение. Текущее продолжение получает результат вычисления, начальное продолжение имеет вид

$$\kappa_0 = \lambda v.v. \quad (3)$$

Окружение представим как функцию, которая отображает множество переменных v на множество значений ε :

$$\rho : v \rightarrow \varepsilon. \quad (4)$$

Значения ε включают в себя множество натуральных чисел, множество пар $(\varepsilon, \varepsilon)$ и множество функций ϕ .

Основные элементы функционального языка включают в себя:

- цитирование;
- обращение к переменным;
- последовательность действий;

- ветвление;
- присваивание;
- абстракцию;
- аппликацию.

Цитирование – это повторение значения выражения без изменений. Для чисел естественно автоцитирование (неизменность значения). Выражения в функции $\mathcal{E}$ будем заключать в семантические скобки $[\text{ и }]$. Денотация цитирования показана в формуле (5):

$$\mathcal{E}[\text{quote } \varepsilon] = \lambda \text{rk}.\varepsilon. \quad (5)$$

Чтобы получить значение переменной, нужно вычислить функцию окружения [формула (6)]. Функция окружения должна учитывать возможность ошибки – отсутствие переменной в окружении:

$$\mathcal{E}[v] = \lambda \text{rk}.(pv). \quad (6)$$

Для денотации последовательности вычисления введем обозначение π^+ , что означает последовательность из одного или более элементов программы π . Обозначение π^* означает последовательность из нуля или более элементов программы π . В последовательности все элементы должны вычисляться слева направо. Результатом вычисления последовательности является вычисленное значение последнего элемента последовательности. Введем вспомогательную функцию $\mathcal{E}^+$. Тогда денотация последовательности вычислений будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}[\text{progn } \pi^+] \text{rk} &= (\mathcal{E}^+[\pi^+] \text{rk}), \\ \mathcal{E}^+[\pi] \text{rk} &= \mathcal{E}[\pi] \text{rk}, \\ \mathcal{E}^+[\pi \pi^+] \text{rk} &= \mathcal{E}[\pi] \text{rk} \lambda \varepsilon. (\mathcal{E}^+[\pi^+] \text{rk}). \end{aligned} \quad (7)$$

Для денотации ветвления необходимо представить булевы значения в виде лямбда-функций:

$$\begin{aligned} T &= \lambda x y. x, \\ F &= \lambda x y. y. \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда ветвление можно записать таким образом:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}[\text{if } \pi \pi_1 \pi_2]_{\rho k} &= \\ &= \mathcal{E}[\pi]_{\rho \lambda \epsilon}. (\text{boolify } \epsilon) \mathcal{E}[\pi_1]_{\rho k} \mathcal{E}[\pi_2]_{\rho k}. \end{aligned} \quad (9)$$

В формуле (9) функция `boolify` должна приводить значение к булевому типу. Сначала вычисляется условие, затем результат передается в продолжение, где используется как функция с двумя аргументами, которые представляют собой вычисления, выполняемые по истине и по лжи.

Для денотации присваивания введем обозначение $\rho[v \rightarrow \epsilon]$, которое означает расширение окружения ρ , куда добавляются новая переменная v со значением ϵ . Тогда денотация присваивания будет иметь вид

$$\mathcal{E}[\text{setq } v \pi]_{\rho k} = \mathcal{E}[\pi]_{\rho \lambda \epsilon}. k \epsilon \rho[v \rightarrow \epsilon]. \quad (10)$$

Абстракция представляет собой передачу в продолжение функции как объекта. При применении функции должно произойти расширение окружения аргументами функции ϵ^* и подстановка аргументов ϵ^* вместо параметров v^* :

$$\begin{aligned} \mathcal{E}[\text{lambda } (v^*) \pi^+]_{\rho k} &= \\ &= k \lambda \epsilon^* k_1. \mathcal{E}^+[\pi^+]_{\rho[v^* \rightarrow \epsilon^*]} k_1. \end{aligned} \quad (11)$$

Аппликация – это применение функции к ее аргументам. В начале должны быть вычислены выражения аргументов, затем вычисляется выражение

функции (абстракция), и вычисленные аргументы подставляются в абстрактную функцию. При вычислении аргументов $\mathcal{E}^*$ обозначим пустую последовательность как $\langle \rangle$, а конкатенацию последовательностей как $\S$. Тогда денотация аппликации будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}[\pi \pi^*]_{\rho k} &= \mathcal{E}[\pi]_{\rho \lambda \phi}. \mathcal{E}^*[\pi^*]_{\rho \lambda \epsilon^*}. \phi \epsilon^* k, \\ \mathcal{E}^*[\langle \rangle]_{\rho k} &= k \langle \rangle, \\ \mathcal{E}^*[\pi \pi^*]_{\rho k} &= \\ &= \mathcal{E}[\pi]_{\rho \lambda \epsilon}. \mathcal{E}^*[\pi^*]_{\rho \lambda \epsilon^*}. k \langle \epsilon \rangle \S \epsilon^*. \end{aligned} \quad (12)$$

Макросы вычисляются как вычисление результата подстановки параметров. Это можно определить как два вычисления тела макроса:

$$\mathcal{E}[\text{macro } \pi \epsilon]_{\rho k} = \mathcal{E}[\mathcal{E}[\pi \epsilon]_{\rho k}]_{\rho k}. \quad (13)$$

Чтобы выполнить макроподстановку, введем дополнительные операции:

- ‘ – квазицитирование (частичное цитирование);
- , – вычисление внутри квазицитирования;
- , @ – вычисление списка внутри квазицитирования.

Квазицитирование выполняется как цитирование для атомов и рекурсивно для пар.

$$\begin{aligned} \mathcal{E}['\pi]_{\rho k} &= \mathcal{E}^*[\pi]_{\rho k}, \\ \mathcal{E}^*[\epsilon]_{\rho k} &= k \epsilon, \\ \mathcal{E}^*[\langle \rangle]_{\rho k} &= k \langle \rangle, \\ \mathcal{E}^*[(\pi \pi^*)]_{\rho k} &= k (\mathcal{E}^*[\pi]_{\rho k}. \mathcal{E}^*[\pi^*]_{\rho k}). \end{aligned} \quad (14)$$

Вычисление выражения внутри квазицитирования имеет вид

$$\mathcal{E}^*[\pi]_{\rho k} = \mathcal{E}[\pi]_{\rho k}. \quad (15)$$

При вычислении списка внутри квазицитирования полученный список конкатенируется с остальными частями списка:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}[\pi 1*, @ \pi \pi 2*]_{pk} = \\ \mathcal{E}[\pi 1*]_{pk} \mathcal{E}[\pi] \mathcal{E}[\pi 2*] \end{aligned} \quad (16)$$

Результаты и их обсуждение

Архитектура интерпретатора показана ниже (рис. 1).

Главный цикл интерпретатора (модуль `main.c`) представляет собой

традиционный цикл чтения данных, вычисления и печати результата (REPL). Когда данные заканчиваются (конец потока), то цикл прерывается. Обработка ошибок основана на сохранении состояния в начале цикла (функция `setjmp`). При возникновении ошибочной ситуации печатается соответствующее сообщение и происходит безусловный переход на начало цикла (функция `longjmp`).

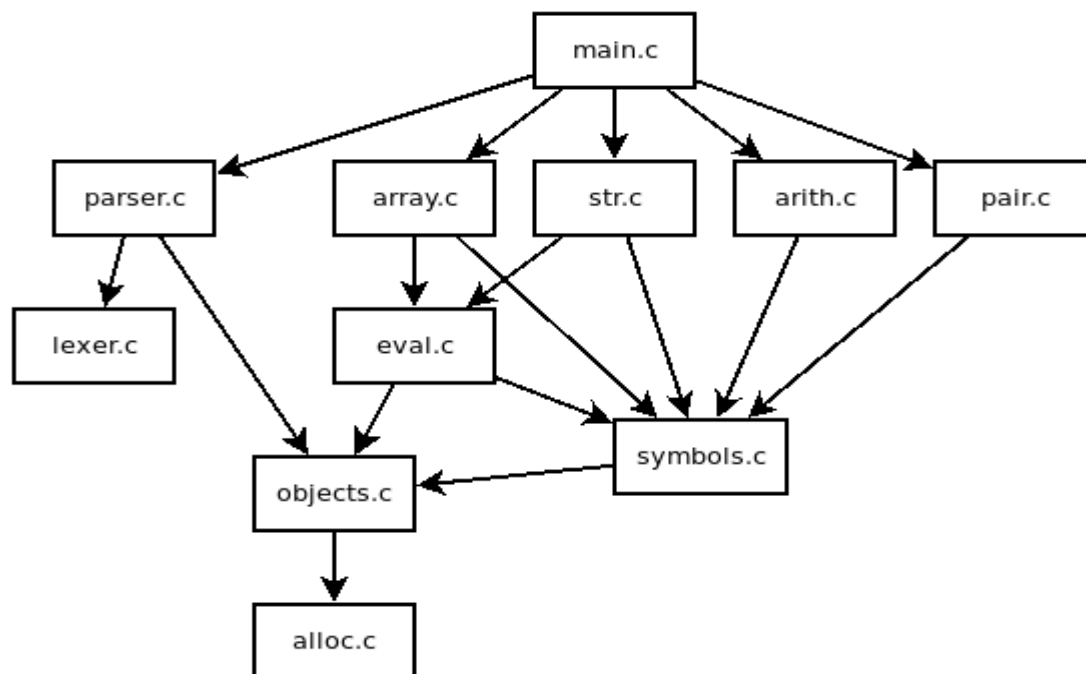


Рис. 1. Архитектура интерпретатора

Fig. 1. Interpreter architecture

Чтение входного потока данных включает в себя этапы лексического и синтаксического анализа. На этапе лексического анализа (модуль `lexer.c`) входной поток символов распознается как лексемы: целые, вещественные числа, символьные и обычные строки, скобки, служебные символы. Далее синтаксический анализатор (модуль `parser.c`)

проверяет синтаксис языка на корректность и строит объект, содержащий введенное выражение.

Объектами языка являются числа, символы, пары, строки и массивы. Модуль `objects.c` отвечает за создание и освобождение объектов. Объекты создаются автоматически (без принудительного указания программиста) и

освобождаются по мере необходимости (сборка мусора). В данном интерпретаторе для сборки мусора использован алгоритм пометки и очистки.

Модуль `alloc.c` отвечает за низкоуровневое выделение и освобождение памяти для объектов. Все объекты выравниваются по границе памяти в 16 байт. Тип объекта представляет собой указатель, у которого младшие четыре бита всегда равны нулю. Три младших бита используются как тег (тип объекта), четвертый бит используется для пометки при сборке мусора. Числа, которые помещаются в оставшиеся биты, кроме этих четырех, являются маленькими числами, для которых не нужны дополнительные структуры данных и не нужна сборка мусора. Для больших чисел используется отдельный тип объекта и дополнительные структуры данных. Символы хранятся в хеш-таблице для быстрого поиска (модуль `symbols.c`).

Главная часть интерпретатора – это вычислитель (модуль `eval.c`). Он выполняет вычисление исходных выражений-объектов (π в денотации), в результате которого получается результат – тоже объект. Вычислитель использует окружение ρ для лексических переменных. Динамические переменные хранят свои значения в структуре символа (поле `value`). Это образует отдельную область видимости для переменных.

Абстракции функций λ также хранятся в структуре символа (поле `lambda`). Встроенные функции делятся специальные формы и обычные

функции. Для обычных функций всегда перед вызовом функции вычисляются аргументы (слева направо), а у специальных форм аргументы передаются в форму без вычислений. Имена функций образуют область видимости отдельную от переменных (т. е. возможно существование переменной и функции с одним именем). Встроенные примитивы используют поле `func` структуры символа для адреса внутренней функции, которая вызывается при применении формы примитива. Сами примитивы распределены между различными модулями. Модуль `arith.c` содержит примитивы для арифметических и побитовых операций. Модуль `pair.c` содержит функции для работы с точечными парами. Модуль `str.c` содержит функции для работы со строками. Модуль `array.c` содержит функции для работы с массивами.

Макросы используют отдельное поле `macro` в структуре символа. Область имен макросов совпадает с областью имен функций. Макровывод происходит в два этапа. Сначала происходит макроподстановка, а затем ее результат вычисляется тем же вычислителем. Если результат вычисления также содержит макросы, то происходит рекурсия.

С помощью полученного интерпретатора с возможностями метапрограммирования возможно реализовать новые синтаксические конструкции, которые будут работать так же, как и встроенные формы. Возьмем встроенную специальную форму `cond`. Ее параметрами является список из пар $(p\ n)$, где p –

предикат, а *en* – выражение. Значением специальной формы *cond* является первое выражение *en*, для которого предикат *pn* равен истине. На основе этой специальной формы можно сделать традиционный для программирования условный оператор *if* (рис. 2).

```
(defmacro if (test true false)
  "Условный _ оператор"
  "test _ – _ условие"
  "true _ – _ выражение _ по _ истине"
  "false _ – _ выражение _ по _ лжи"
  `(cond (,test ,true)
    (t ,false)))
```

Рис. 2. Условный оператор

Fig. 2. Conditional operator

Недостатком данного оператора является обязательное указание выражения по истине и по лжи, а также, если необходимо использовать последовательность операторов, тогда приходится использовать форму *progn*. Эти недостатки можно устранить, если определить неполный условный оператор, тело которого может состоять из нескольких выражений, причем мы можем использовать уже определенный оператор *if* (рис. 3).

```
(defmacro when (test &rest body)
  "Условный _ неполный _ оператор"
  "test _ – _ условие"
  "body _ – _ список _ выражений _ по _ истине"
  `(if ,test (progn ,@body) nil))
```

Рис. 3. Неполный условный оператор

Fig. 3. Incomplete conditional operator

По аналогии определим условный оператор, который выполняет множество выражений, если условие не выполняется (рис. 4).

```
(defmacro unless (test &rest body)
  "Условный _ неполный _ оператор"
  "test _ – _ условие"
  "body _ – _ список _ выражений _ по _ лжи"
  `(if ,test nil (progn ,@body)))
```

Рис. 4. Неполный условный оператор с невыполнением условия

Fig. 4. Incomplete conditional operator on false condition

Среди операторов ветвления существует также оператор выбора, который по результату вычисления выражения выбирает значение из пар, а также имеет значение по умолчанию (рис. 5).

```
(case k
  ((1 2)
   (2 3)
   (otherwise 4)))
```

Рис. 5. Пример оператора выбора

Fig. 5. Selection operator example

Это соответствует следующему выражению (рис. 6).

```
(if (equal k 1) 2
    (if (equal k 2) 3 4))
```

Рис. 6. Оператор выбора выраженный через *if*

Fig. 6. Selection operator expressed with *if*

Для реализации оператора выбора удобно воспользоваться формой *cond*, которая похожа на оператор выбора, а

также сделать вспомогательную функцию, которая создает пару из предиката и выражения. Для создания тела `cond` используется функция отображения `map` (рис. 7).

```
(defmacro case (val &rest list)
  '(cond ,@(map '(lambda (x) (case-func
x val)) list)))
```

```
(defun case-func (p val)
  "(e _ v) _-> _((equal _ val _ e) _ v)"
  "(otherwise _ v) _-> _ (t _ v)"
  (if (eq (car p) 'otherwise)
      (list t (cadr p))
      (list (list 'equal (car p) val) (cadr p))))
```

Рис. 7. Макрос оператора выбора

Fig. 7. Selection operator macro

После макроподстановки выражение на рисунке 5 будет преобразовано в следующее выражение (рис. 8).

```
(cond ((equal k 1) 2)
      ((equal k 2) 3)
      (t 4))
```

Рис. 8. Результат макроподстановки оператора `case`

Fig. 8. Case operator macro expansion

Оператор `let` создает блок выражений с лексическими переменными, связывая эти переменными со значениями. Например выражение (рис. 9) будет иметь значение 30.

```
(let ((x 10)
      (y 20))
  (+ x y))
```

Рис. 9. Оператор `let`

Fig. 9. Let operator

Для реализации этого оператора можно воспользоваться абстрактной λ -функцией с параметрами, которые соответствуют переменным. Эта функция применяется к значениям, с которыми нужно связать переменные. Тогда выражение на рисунке 9 можно записать как применение λ -функции (рис. 10).

```
((lambda (x y)
  (+ x y)) 10 20)
```

Рис. 10. λ -выражение, соответствующее оператору `let`

Fig. 10. Lambda-expression for let operator

Как и в случае с оператором выбора, для реализации оператора `let` определим две вспомогательные функции, которые на основе списка привязок переменных получают списки параметров и значений (рис. 11).

```
(defmacro let (vars &rest body)
  "Блок _ локальных _ переменных"
  '((lambda ,(get-vars vars) ,@body)
    ,(get-vals vars)))
```

```
(defun get-vars (v)
  "Получение _ списка _ переменных _ для _ let"
  (if (null v) nil
      (cons (caar v) (get-vars (cdr v)))))
```

```
(defun get-vals (v)
  "Получение _ списка _ значений _ для _ let"
  (if (null v) nil
      (cons (cadr v) (get-vals (cdr v)))))
```

Рис. 11. Реализация оператора `let`

Fig. 11. Let operator macro

Подобный подход к связыванию лексических переменных позволяет определять только независимые

переменные. Если существует необходимость при связывании новой переменной использовать значение предыдущей, то необходимо определить другой оператор `let*` (рис. 12).

```
(let* ((x 0)
      (y (+ x 1))
      (z (* y 5)))
      (+ x y z))
```

Рис. 12. Оператор `let*`

Fig. 12. `Let*` operator

Чтобы последующая переменная могла обращаться к предыдущей, необходимо, чтобы предыдущие переменные были свободными. Это можно выразить как группу вложенных абстракций и применений (рис. 13).

```
((lambda (x)
  ((lambda (y)
    ((lambda (z)
      (+ x y z))
      (* y 5)))
    (+ x 1)))
  0)
```

Рис. 13. Требуемый результат макроподстановки для оператора `let*`

Fig. 13. Needed macroexpansion for `let*` operator

При макроподстановке мы можем получить список параметров и аргументов, используя те же вспомогательные функции для оператора `let`. Но также необходима дополнительный рекурсивный макрос, который бы формировал каскад из абстракций с применением, параллельно обходя два списка

параметров и аргументов. В результате макрос для оператора имеет следующий вид (рис. 14).

```
(defmacro inner-let* (vars vals &rest body)
  '((lambda (,(car vars)) (if ,(null (cdr vars))
                                (progn ,@body)
                                (inner-let* ,(cdr vars) ,(cdr vals) ,@body)))
    ,(car vals)))
```

```
(defmacro let* (vars &rest body)
  '(inner-let* ,(get-vars vars) ,(get-vals vars) ,@body))
```

Рис. 14. Макроопределение для оператора `let*`

Fig. 14. `Let*` operator macrodefinition

Выводы

В результате работы была построена модель с денотационной семантикой для интерпретатора функционального языка с возможностями метапрограммирования. Был реализован интерпретатор с поддержкой метапрограммирования. Созданы макросы для операторов ветвления, выбора, блока связанных переменных. Таким образом, интерпретатор с поддержкой метапрограммирования может содержать небольшое число встроенных форм, а любые другие формы могут быть реализованы как макросы, при необходимости совместно с функциями. Это позволяет существенно сократить объем программного кода, необходимого для написания интерпретатора.

Список литературы

1. Сайбель П. Практическое использование Common Lisp. М.: ДМК Пресс, 2017. 488 с.
2. Душкин Р. В. Функциональное программирование на языке Haskell. М.: ДМК Пресс, 2016. 608 с.
3. Узких Г. Ю. Функциональное программирование и его влияние на качество кода и обслуживаемость // Вестник науки. 2023. Т. 4, № 8(65). С. 316–318. EDN TQONQF.
4. Телегин В. А. Влияние функционального программирования на современные языки программирования // Инновации и инвестиции. 2023. № 7. С. 189–192. EDN VQEXEK
5. Городняя Л. В. Перспективы функционального программирования параллельных вычислений // Электронные библиотеки. 2021. Т. 24, № 6. С. 1090–1116. <https://doi.org/10.26907/1562-5419-2021-24-6-1090-1116>. EDN LOGTRU
6. Билуха И. Н. Актуальность функционального программирования // Студенческий вестник. 2020. № 5-4 (103). С. 60–61. EDN VTDJGN
7. Krasnov M. M., Feodoritova O. B. Using the functional programming library for solving numerical problems on graphics accelerators with CUDA technology // Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS. 2021. Vol. 33, No. 5. P. 167–180. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2021-33\(5\)-10](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2021-33(5)-10). EDN WXDIFI
8. Domkin V. Programming Algorithms in Lisp. Berkeley: Apress, 2021. 377 p.
9. Грэй П. ANSI Common LISP. М.: Символ-Плюс, 2020. 448 с.
10. Малов А. В., Родионов С. В. Реализация упрощенного алгоритма Байеса в среде функционального программирования COMMON LISP // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 2. С. 32–37. EDN TKJVLJ
11. Вторников А. Lisp: маленький гигант // Системный администратор. 2016. № 6 (163). С. 64–69. EDN VZGXVD
12. Nystrom R. Crafting interpreters. М.: Nobel Press, 2024. 640 p.
13. Ульман Джеффри Д., Сети Рави. Компиляторы: принципы, технологии и инструментарий. М.: Диалектика-Вильямс, 2018. 1184 с.
14. Халилов Э. Р. Разработка интерпретатора для языка программирования видеоигр // Информационно-компьютерные технологии в экономике, образовании и социальной сфере. 2020. № 1 (27). С. 79–89. EDN KNIRUT
15. Абельсон Х., Сассман Д. Структура и интерпретация компьютерных программ. М.: КДУ, 2022. 608 с.
16. Григорьев Е. А., Климов Н. С. Использование Ahead-Of-Time компиляции в платформе.NET как альтернатива Just-In-Time компиляции // E-Scio. 2019. № 11 (38). С. 364–371. EDN EOMDHH

17. Харин И. А., Раскатова М. В. Анализ алгоритмов составляющих частей компилятора и его оптимизации // *Computational Nanotechnology*. 2023. Т. 10, № 2. С. 26–35. <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2023-10-2-26-35>. EDN BDGKMA

18. Штейнберг Б. Я., Штейнберг О. Б. Преобразования программ – фундаментальная основа создания оптимизирующих распараллеливающих компиляторов // *Программные системы: теория и приложения*. 2021. Т. 12, № 1 (48). С. 21–113. <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2021-12-1-21-113>. EDN FZFEPX

19. Чаплыгин А. А. Использование метапрограммных средств языка Common Lisp для разработки систем эмуляторов // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2023. Т. 13, № 3. С. 135–145.

20. Krishnamurthi Sh. *Programming Languages: Application and Interpretation*. Providence: Brown University, 2022. 376 p.

References

1. Seibel P. *Practical use of Common Lisp*. Moscow: DMK Press; 2017. 488 p. (In Russ.)
2. Dushkin R.V. *Functional programming in Haskell*. Moscow: DMK Press; 2016. 608 p. (In Russ.)
3. Uzikh G.Y. Functional programming and its impact on code quality and maintainability. *Vestnik nauki = Bulletin of Science*. 2023;4(8):316–318. (In Russ.) EDN TQONQF
4. Telegin V.A. The influence of functional programming on modern programming languages. *Innovatsii i investitsii = Innovations and Investments*. 2023;(7):189–192. (In Russ.) EDN VQEXEK
5. Gorodnyaya L.V. Prospects for functional programming of parallel computing. *Elektronnye biblioteki = Electronic Libraries*. 2021;24(6):1090–1116. (In Russ.) <https://doi.org/10.26907/1562-5419-2021-24-6-1090-1116>. EDN LOGTRU
6. Bilukha I.N. Relevance of functional programming. *Student Bulletin*. 2020;(5-4):60–61. (In Russ.) EDN VTDJGN
7. Krasnov M.M., Feodoritova O.B. Using the functional programming library for solving numerical problems on graphics accelerators with CUDA technology. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2021;33(5):167–180. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2021-33\(5\)-10](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2021-33(5)-10). EDN WXDIFI
8. Domkin V. *Programming Algorithms in Lisp*. Berkeley: Apress; 2021. 377 p.
9. Graham P. *ANSI Common LISP*. Moscow: Symvol-Plus; 2020. 448 p. (In Russ.)
10. Malov A.V., Rodionov S.V. Implementation of the simplified Bayes algorithm in the COMMON LISP functional programming environment. *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University = Proceedings of St. Petersburg Electrotechnical University "LETI"*. 2015;(2):32–37. (In Russ.) EDN TKJVLJ

11. Vtornikov A. Lisp: a little giant. *Sistemnyi administrator = System Administrator*. 2016;(6):64–69. (In Russ.) EDN VZGXVD
12. Nystrom R. *Crafting interpreters*. Moscow: Nobel Press; 2024. 640 p.
13. Ullman Jeffrey D., Ravi Networks. *Compilers: principles, technologies and tools*. Moscow: Dialectics-Williams; 2018. 1184 p. (In Russ.)
14. Khalilov E.R. Development of an interpreter for a video game programming language. *Informatsionno-komp'yuternye tekhnologii v ekonomike, obrazovanii i sotsial'noi sfere = Information and Computer Technologies in Economics, Education and Social Sphere*. 2020;(1):79–89. (In Russ.) EDN KNIRUT
15. Abelson H., Sussman D. *Structure and interpretation of computer programs*. Moscow: KDU; 2022. 608 p. (In Russ.)
16. Grigoriev E.A., Klimov N.S. Using Ahead-Of-Time compilation in the .NET platform as an alternative to Just-In-Time compilation. *E-Scio*. 2019;11:364–371. (In Russ.) EDN EOMDHH
17. Kharin I.A., Raskatova M.V. Analysis of algorithms for compiler components and its optimization. *Computational Nanotechnology*. 2023;10(2):26–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2023-10-2-26-35>. EDN BDGKMA
18. Steinberg B.Y., Steinberg O.B. Program transformations are the fundamental basis for creating optimizing parallelizing compilers. *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya = Software Systems: Theory and Applications*. 2021;12(1):21–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2021-12-1-21-113>. EDN FZFEPX
19. Chaplygin A.A. Using metaprogramming tools of the Common Lisp language to develop emulator systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vy-chislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;13(3):135–145. (In Russ.)
20. Krishnamurthi Sh. *Programming Languages: Application and Interpretation*. Providence: Brown University; 2022. 376 p.

Информация об авторе / Information about the Author

Чаплыгин Александр Александрович,
кандидат технических наук, доцент кафедры
программной инженерии, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: alex_chaplygin@mail.ru,
ORCID: 0009-0009-8739-2695

Aleksandr A. Chaplygin, Candidate of Sciences
(Engineering), Associate Professor
of the Department of Software Engineering,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: alex_chaplygin@mail.ru,
ORCID: 0009-0009-8739-2695

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-194-212>

УДК 004.8.032.26

Разработка имитационной модели и настройка гиперпараметров нейронной сети для прогнозирования возможных состояний сети малых космических аппаратов

Е. А. Шиленков¹, С. Н. Фролов¹, Е. А. Титенко¹ ✉

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 разработка имитационной модели и настройка гиперпараметров нейронной сети для прогнозирования возможных состояний.

Методы основаны на методах теории искусственного интеллекта для управления группировкой малых космических аппаратов (МКА) – использование адаптивных средств, позволяющих принимать решения аналогично механизмам мышления человека. Применительно к системам космической связи с гетерогенной структурой методы и технологии искусственного интеллекта направлены на процессы прогнозирования состояния в каналах связи между узлами сети и автоматической реконфигурации сети аппаратов на основе процессов обучения нейронной сети. Одной из наиболее важных функций сетевого программного обеспечения для применения когнитивных алгоритмов является прогнозирование качества связи между парами МКА.

Результаты. Разработан метод применения нейронной сети архитектуры Transformer для прогнозирования возможных состояний сети МКА, который обеспечивает агрегирование и временную синхронизацию данных о состоянии сети МКА, их применение для обучения нейронной сети, а также использования нейронной сети для прогнозирования качества связи. Создан формат данных для обучающей выборки, основанный на представлении состояния сети МКА, которая обеспечивает генерацию начального состояния сети, моделирование проактивного режима её работы, сбор маркеров состояния сети МКА для порождения наборов обучающих данных, в виде хронологических последовательностей, группируемых в кадры, и позволяющий снизить объем данных, передаваемый между МКА при создании обучающей выборки. Разработана имитационная модель сети МКА, которая обеспечивает генерацию начального состояния сети, моделирование проактивного режима ее работы, сбор сведений о состоянии сети МКА для порождения наборов синтетических обучающих данных.

Заключение. В статье разработана имитационная модель сети МКА для порождения синтетических обучающих данных и прогнозирования возможных состояний сети МКА, а также метод применения нейронной сети для прогнозирования возможных состояний сети МКА.

Ключевые слова: малый космический аппарат; искусственная нейронная сеть; прогнозирование; имитационная модель сети; данные; формат; интерфейс.

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

Для цитирования: Шиленков Е. А., Фролов С. Н., Титенко Е. А. Разработка имитационной модели и настройка гиперпараметров нейронной сети для прогнозирования возможных состояний сети малых космических аппаратов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 2. С. 194–212. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-194-212>

Поступила в редакцию 10.04.2024

Подписана в печать 04.05.2024

Опубликована 28.06.2024

© Шиленков Е. А., Фролов С. Н., Титенко Е. А., 2024

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024; 14(2): 194–212

Development of a simulation model and adjustment of hyperparameters of a neural network for predicting possible states of a network of small space carriages

Egor A. Shilenkov¹, Sergey N. Frolov¹, Evgeniy A. Titenko¹ ✉

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 develop a simulation model and tune the hyperparameters of a neural network to predict possible states of a network of small spacecraft.

The research methods are based on the concepts of the theory of artificial intelligence to control a group of small spacecraft (SSV) – the use of adaptive methods and tools to make decisions, similar to the mechanisms of human thinking. In relation to space communication systems with a heterogeneous structure, artificial intelligence methods and technologies are aimed at predicting the state of communication channels between network nodes and automatically reconfiguring a network of devices based on neural network learning processes. One of the most important functions of network software for the application of cognitive algorithms is to predict the quality of communication between pairs of SSVs.

Results. A method has been developed for using the Transformer architecture neural network to predict possible states of the SSV network, which provides aggregation and time synchronization of data on the state of the SSV network, their use for training the neural network, as well as using the neural network to predict the quality of communication. The data format for the training sample has been created, based on the representation of the state of the SSV network, which ensures the generation of the initial state of the network, modeling the proactive mode of its operation, collecting SSV network state markers to generate training data sets in the form of chronological sequences grouped into frames, and allowing to reduce the amount of data transferred between SSVs when creating a training set. A simulation model of the SSV network has been developed, which provides generation of the initial state of the network, modeling of the proactive mode of its operation, and collection of information about the state of the SSV network to generate sets of synthetic training data.

Conclusion. The article develops a simulation model of the SSV network for generating synthetic training data and predicting possible states of the SSV network, as well as a method for using a neural network to predict possible states of the SSV network.

Keywords: small spacecraft; artificial neural network; forecasting; network simulation model; data; format; interface.

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

For citation: Shilenkov E.A., Frolov S.N., Titenko E.A. Development of a simulation model and adjustment of hyperparameters of a neural network for predicting possible states of a network of small space carriages. *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(2):194–212. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-194-212>

Received 10.04.2024

Accepted 04.05.2024

Published 28.06.2024

Введение

Весьма востребованной функцией сетевого программного обеспечения для применения когнитивных алгоритмов является прогнозирование качества связи между парами малых космических аппаратов (МКА), результаты которого будут использованы для построения маршрутов передачи данных с учетом минимизации потерь данных [1]. Согласно параметрической модели сети МКА, задача прогнозирования заключается в формировании матрицы качества связи $Q(t_+)$ на основе рассчитанной матрицы прямой видимости $D(t_+)$ и текущего множества векторов состояний МКА $\{V_i(t)\}$ с помощью функционала $F_{Q+}(\cdot)$ [2]. Кроме того, данный функционал в качестве параметра также принимает матрицу весовых коэффициентов $W(t_-)$, которая формируется путём обучения $F_{Ql}(\cdot)$ на основе фактических данных о пространственных координатах МКА $\{p_i(t_-)\}$, их состоянии $\{V_i(t_-)\}$ и качестве связи $Q(t_-)$ [3].

Метод применения нейронной сети для прогнозирования возможных состояний сети малых космических аппаратов должен реализовать функционалы обучения $F_{Ql}(\cdot)$ и прогнозирования $F_{Q+}(\cdot)$ и соответственно разделен на две части:

1. Сбор фактических данных о состоянии сети МКА и обучение или дообучение нейросетевого алгоритма прогнозирования с формированием весовых коэффициентов.

2. Расчет матрицы прямой видимости МКА и прогнозирование матрицы качества связи в заданном интервале времени [4].

Для реализации $F_{Ql}(\cdot)$ необходимо получить следующие данные о состоянии сети в целом и каждого МКА в частности:

- трехмерные геодезические координаты $p_i(t_-)$ МКА, которые рассчитываются на основе их актуальных кеплеровских параметров орбиты (*TLE*);
- векторы состояния МКА $V_i(t_-)$, формируемые средствами диагностики аппаратной платформы;
- матрицы фактического качества связи $Q(t_-)$, которые создаются на основе отправки тестовых сигналов и регистрации времени их получения в активной фазе работы сети МКА.

Материалы и методы

Все данные для обучения являются хронологическими рядами, причем каждый из компонентов имеет собственный открытый интервал обновления: $p_i(t_-)$ – 1–5 с; $Q(t_-)$ – 5–20 с; $V_i(t_-)$ – 5–10 мин (рис. 1).

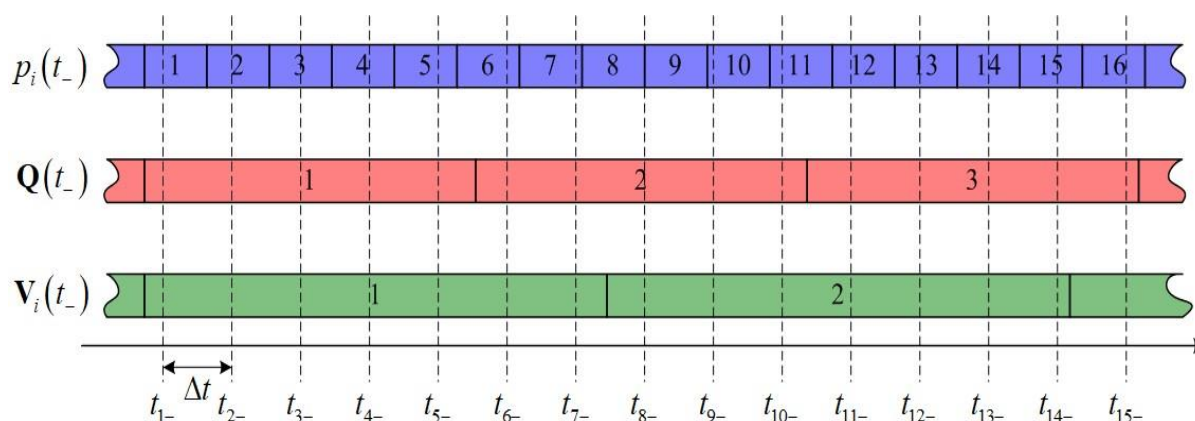


Рис. 1. Хронологические ряды данных о состоянии малого космического аппарата и сети

Fig. 1. Chronological series of data on the state of a small spacecraft and network

Как показано на рисунке 1, для обучения используются хронологические срезы, формируемые с заданным временным интервалом Δt . До момента обновления действительными считаются крайние полученные данные. Так, например, для момента времени t_{7-} хронологический срез включает в себя $p_i(t_{7-}) \rightarrow 7$, $Q(t_{7-}) \rightarrow 2$, $V_i(t_{7-}) \rightarrow 1$. Формируемые таким образом срезы являются исходными данными для обучения.

В рамках концептуальной модели сети МКА показано, что наилучший вариант применения ИНС для прогнозирования качества связи описывается отображением $\langle (p_i(t_+), V_i(t_+)), (p_j(t_+), V_j(t_+)) \rangle \rightarrow q_{ij}(t_+)$, которое связывает пространственные геодезические координаты и векторы состояний пары МКА с качеством связи между ними. Следует отметить, что отображение некоммутативно, поскольку $q_{ij}(t_+) \neq q_{ji}(t_+)$, хотя, без сомнений, значения должны быть близки.

В рамках модели сети МКА также отмечена временная коррелированность

всех указанных выше значений, что позволяет обобщить отображение на заданный начальный момент t_{0+} временной интервал с шагом Δt длиной N_t :

$$\langle p_i, V_i, p_j, V_j \rangle_\tau \rightarrow \langle q_{ij} \rangle_\tau, \quad \tau = t_{0+} + m \cdot \Delta t, m = \overline{1, N_t}, \quad (1)$$

где τ – дискретное время, используемое для обучения искусственной нейронной сети (ИНС) и прогнозирования [5].

Таким образом, как при обучении ИНС, так и при прогнозировании используются хронологические последовательности («временные» окна) данных, что позволяет использовать когнитивные возможности алгоритмов для выявления темпоральных связей в обучающих данных. Функционал $F_{QI}(\cdot)$ заключается в итеративном применении функции корректировки весов на основе предъявляемых на вход сети хронологических последовательностей данных о положении и состоянии МКА и соответствующих им данных о качестве связи:

$$W_n = f_{QI}(\langle p_i, V_i, p_j, V_j, q_{ij} \rangle_\tau, W_{n-1}), \quad (2)$$

$$\tau = t_{0+} + m \cdot \Delta t, m = \overline{1, N_t}, i = \overline{1, N_{MKA}(\tau)}, j = \overline{1, N_{MKA}(\tau)}. \quad (3)$$

Реализация функции f_{Ql} корректировки весов и принципы группировки подаваемых на вход данных зависят от выбранной архитектуры ИНС.

Количество итераций N_l обучения зависит от достижения необходимой точности прогнозирования ξ , определяемой путем применения функции $f_{Q+}(\cdot)$ к фактическим данным, не входящим в обучающий набор и называемый валидационным [6]:

$$N_l = \arg \min_m M \left[f_{Q+} \left(d_{ij}(t_-), p_i(t_-), p_j(t_-), V_i(t_-), V_j(t_-), W_n \right) - q_{ij}(t_-) \right] < \xi. \quad (4)$$

где $i = j$.

Полноценное обучение с использованием случайным образом заданных начальных значений весов W_0 необходимо выполнять лишь на начальном этапе работы сети МКА по результатам тестовой эксплуатации. В дальнейшем начальной матрицей весов должен выступать результат предыдущего обучения в соответствии с концепцией дообучения или тонкой настройки (fine tune) ИНС для адаптации к изменениям структуры сети и внешних параметров.

Перед дообучением логичным шагом является верификация – оценка точности прогнозирования $f_{Q+}(\cdot)$ с использованием текущей матрицы W на накопленных фактических данных с момента последнего обучения. Дообучение

необходимо выполнять только в том случае, если средняя погрешность прогнозирования превышает заданное пороговое значение ξ .

Полное переобучение с весов W_0 используется в случае, если не удалось достигнуть требуемого значения ошибки прогнозирования за заданное максимальное количество итераций сети.

Предлагаемая периодичность дообучения алгоритма составляет 1 раз в неделю.

Сформированная матрица весовых коэффициентов W используется для прогнозирования качества значений связи $q_{ij}(t_+)$ между парами МКА. Результатом прогнозирования по аналогии с обучением является не единичное значение, а хронологическая последовательность:

$$\langle q_{ij} \rangle_\tau = f_{Q+} \left(\langle p_i, V_i, p_j, V_j \rangle_\tau, W \right), \quad \tau = t_{0+} + m \cdot \Delta t, m = \overline{1, N_t} \quad (5)$$

Учитывая тот факт, что точность прогнозирования в центре диапазона выше, чем на его границах требуемый интервал прогнозирования $[t_{1+}, t_{2+}]$ разбивается на фрагменты с 50% перекрытием, как показано на рисунке 2, для чего используются два хронологических ряда $q_{ij}^{(1)}, q_{ij}^{(2)}$, объединяемые с помощью весового коэффициента $\omega(t) \in [0, 1]$,

$$q_{ij}(t) = \omega(t) \cdot q_{ij}^{(1)}(t) + (1 - \omega(t)) q_{ij}^{(2)}(t). \quad (6)$$

вычислительной нагрузки на аппаратную платформу МКА и снижает качество обучающих данных: разным значениям пространственных координат будут соответствовать одинаковые значения качества [7].

При частоте измерений 3–12 мин за 1 неделю для одной пары МКА в пределе будет накоплено от 30 240 до 120 960 измерений, что достижимо только в случае синхронных орбит пары МКА и наличия постоянной прямой видимости между ними. В остальных случаях значительная часть изменений будет пустой (средняя доля информативных измерений будет определена втором этапе) [8].

Для представления входных данных использован формат с плавающей запятой FP32 (4 байта), поддерживаемый всеми библиотеками нейросетевых вычислений Darknet [9], нейросетевыми ускорителями и большинством процессоров [10]. С учетом ограничений на диапазоны входных и выходных данных также подходит формат FP16, который позволяет добиться более высокой скорости обучения и прогнозирования, но поддерживается он лишь ограниченным числом библиотек и устройств и используется в связке с FP32 [11].

Таким образом, предельный объем данных, накапливаемый за одну неделю для пары МКА при указанном выше диапазоне частот измерений, составляет 120 960–483 840 байт.

Результаты и их обсуждение

Длина хронологической последовательности N_i является гиперпараметром, подлежащим оптимизации в процессе обучения, однако, чтобы не прибегать к перебору значений или эмпирической оценке, необходимо некоторое стартовое значение, рассчитанное из априорной информации об орбитальных параметрах МКА. Большая часть аппаратов – низкоорбитальные (запускаются с разгонных блоков ракетополетчиков или МКС), примем среднюю высоту орбиты МКА, равной 420 км. Орбитальная скорость составляет 7,7 км/с, предельная скорость взаимного движения пары аппаратов – 15,7 км/с, средняя при ортогональных курсах – 10,9 км/с. Радиус прямой видимости на данной высоте составляет 2500 км (с учетом формы орбиты 2520 км), которые пара МКА при средней скорости взаимного движения преодолеет за 230 с. Следовательно, в среднем за одно «окно» прямой видимости пара МКА сможет выполнить от 11 до 46 измерений качества связи [12]. Точность прогнозирования напрямую зависит от количества обучающих данных, поэтому предпочтение отдается максимально возможной частоте измерений. Принимая во внимание особенности точности работы ИНС на границах входных фрагментов, размер хронологического «окна» N_i следует сделать не менее чем двукратно превосходящим количество

измерений, т. е. не менее 92. В итоге принимаем стартовое значение $N_t = 100$.

Вектор $\mathbf{v}_i$ принимаем состоящим из одного интегрального показателя, отражающего текущую выработку ресурса МКА.

Во избежание дублирования данных о положении и состоянии МКА

необходимо хранить их отдельно от показателей качества связи, для чего предлагается следующий формат хранения данных (рис. 4).

Представленную на рисунке 4 структуру, которая является единицей хранения данных обучающей выборки, будем называть кадром состояния сети МКА.

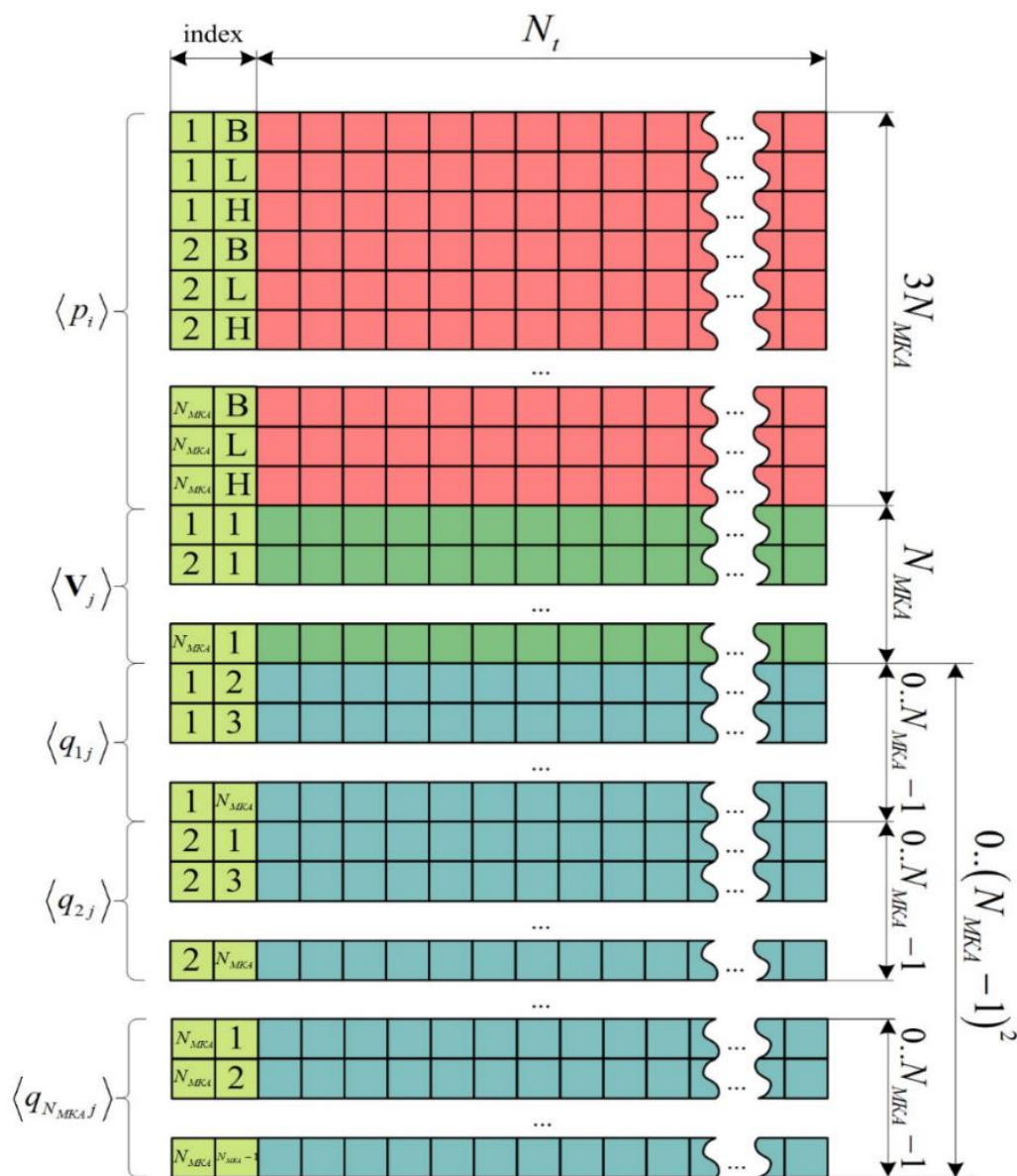


Рис. 4. Формат хранения обучающих данных

Fig. 4. Training data storage format

Каждый кадр при $N_t = 100$ и $\Delta t = 5$ с описывает 500-секундный отрезок

состояния сети МКА и включает фиксированную часть, содержащую данные о

пространственном положении МКА и их состоянии, и переменную часть с данными о качестве связи. Строки кадра содержат индексный заголовок, отражающий номер МКА и индекс элемента: тип координаты, номер элемента вектора или номер второго МКА для значений качества [13].

Объем памяти V_s для хранения строки кадра составляет

$$V_s = (N_t + \text{sizeof}(\text{index})) \cdot \text{sizeof}(\text{FP 32}) = \\ = (100 + 2) \cdot 4 = 408 \text{ байт.}$$

Объем памяти для хранения фиксированной части кадра зависит исключительно от количества МКА в составе сети и рассчитывается как

$$V_f(N_{\text{МКА}}) = V_s \cdot (|p_i| + |V_i|) \cdot N_{\text{МКА}} = \\ = 408 \cdot (3 + 1) \cdot N_{\text{МКА}} = 1632 \cdot N_{\text{МКА}} \text{ байт.}$$

Так, для группировки из 100 МКА $V_f(100) = 163\,200$ байт.

Объем памяти для хранения переменной части варьируется в пределах от нуля до $V_Q(N_{\text{МКА}})$:

$$V_Q(N_{\text{МКА}}) = V_s \cdot (N_{\text{МКА}} - 1)^2 = \\ = 408 \cdot (N_{\text{МКА}} - 1)^2 \text{ байт.}$$

Для группировки из 100 МКА предельный объем памяти составляет

$$V_Q(100) = 408 \cdot (100 - 1)^2 = \\ = 3\,998\,808 \text{ байт}$$

Средний фактический объем V_{QM} переменной части зависит от наличия ненулевых данных о качестве связи (нулевые строки $q_{ij}(\tau)$ игнорируются).

При высоте орбиты 420 км В равномерном распределении МКА оценивается как 3,5% V_Q (соотношение площади окружности с радиусом 2500 км, соответствующей зоне прямой видимости одного МКА и площади сферы с радиусом 6800 км, доступной для расположения узлов сети МКА) [14].

$$V_{QM}(100) = 408 \cdot (100 - 1)^2 \cdot 0,035 = \\ = 139\,958 \text{ байт.}$$

Средний общий объем $V(N_{\text{МКА}})$ рассчитывается как

$$V(N_{\text{МКА}}) = V_f(N_{\text{МКА}}) + V_{QM}(N_{\text{МКА}}) = \\ = 408 \cdot (4 \cdot N_{\text{МКА}} + 0,035(N_{\text{МКА}} - 1)^2) \\ \text{байт.}$$

$$V(100) = 303\,158 \text{ байт.}$$

Кадр состояния сети сопровождается метаданными, включающими:

– временную метку начала кадра Start Datetime (UTC, Int64) и GUID МКА (2 x Int64), сформировавшего кадр (Sender GUID);

– словарь, который связывает номер МКА (Index, Int64) с его уникальным идентификатором GUID (2 x Int64) (рис. 5).

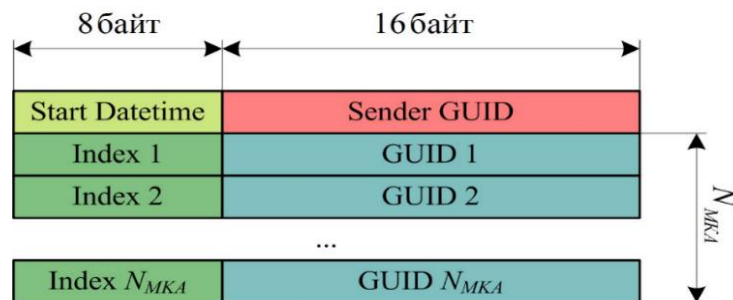


Рис. 5. Метаданные кадра состояния сети

Fig. 5. Network Status Frame Metadata

Объем памяти $V_H(N_{MKA})$ для хранения заголовка составляет

$$V_H(N_{MKA}) = (\text{sizeof}(\text{Int } 64) + \text{sizeof}(\text{GUID})) \times (N_{MKA} + 1) = 24 \cdot (N_{MKA} + 1).$$

$$V_H(100) = 2424 \text{ байт.}$$

В качестве контейнера для кадров состояния сети и метаданных предлагается использовать растровый формат Tagged Image File Format (TIFF), чтение-запись которого выполняется с помощью библиотек libtiff [15] или GDAL [16], реализованных на языках C/C++. Растр метаданных имеет базовый тип данных Int64, кадр состояния сети – FP32. В целях экономии полосы пропускания для передачи кадров между МКА или на наземный сегмент сети при создании могут использоваться алгоритмы сжатия LZW, DEFLATE или ZSTD [17].

В процессе работы рассматривались альтернативные варианты организации кадров состояния сети:

1. Текстовый формат хранения данных – более удобен для интерпретации и

анализа, но имеет в ~10 раз больший объем данных, поэтому применяется лишь на этапе имитационного моделирования.

2. Формат с хронологической маркировкой, пример Robot Operation System (ROS) Bag [18], предназначенный для совместного хранения и хронологической привязки потоков разноскоростных данных (видеопотоков, информации от гироскопа, акселерометра, магнитометра и т. п.). Формат имеет развитый SDK, средства визуализации и рассматривался как основной до принятия решения о синхронизации данных пространственного положения МКА и качества связи, после чего применение формата ROS Bag утратило смысл в силу избыточности временных меток, необходимости синхронизации перед обучением или прогнозированием и большего по сравнению с TIFF размера.

Описанный формат позволяет представить обучающие данные, накапливаемые в течение недели в виде 1210 кадров состояния сети, средний суммарный

объем для сети из 100 МКА которых составляет 352,63 Мбайт.

Для создания первичной обучающей выборки разработан программный имитатор сети МКА на основе библиотек osgEarth [19] и Qt [20]. Имитатор позволяет задавать количество МКА в

группировке, назначать TLE и длительность моделирования (снимок окна визуализации процесса в трехмерном режиме представлен на рис. 6, в двумерном режиме – на рис. 7).

Структура имитационной модели представлена ниже (рис. 8).

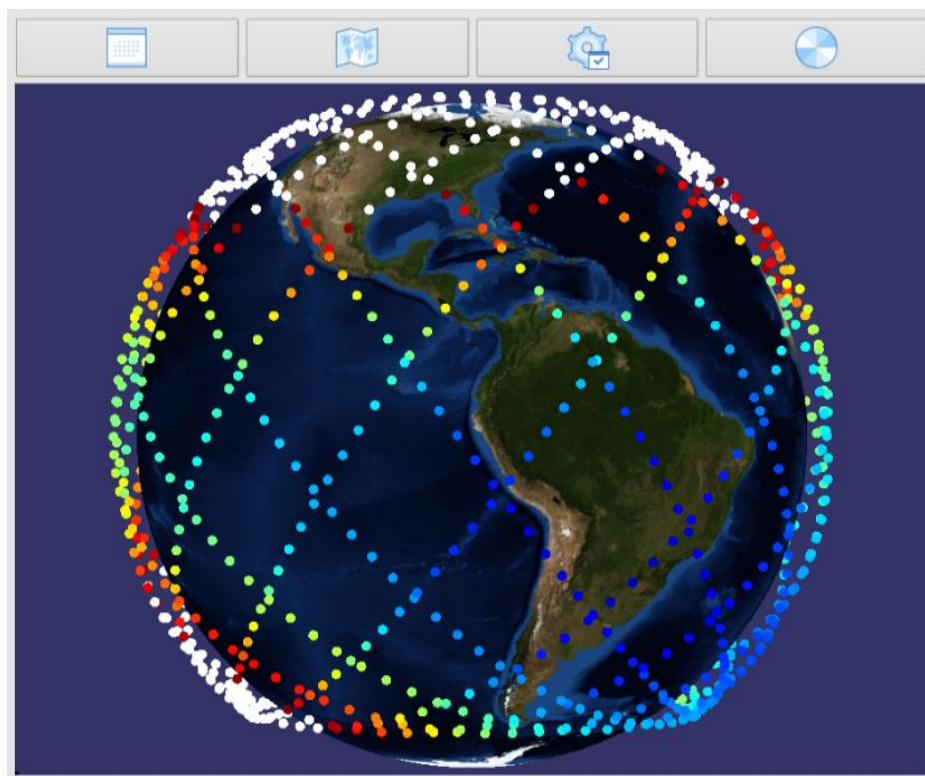


Рис. 6. Схема визуализации сети малых космических аппаратов в трехмерном режиме

Fig. 6. Diagram of visualization of a network of small spacecraft in three-dimensional mode

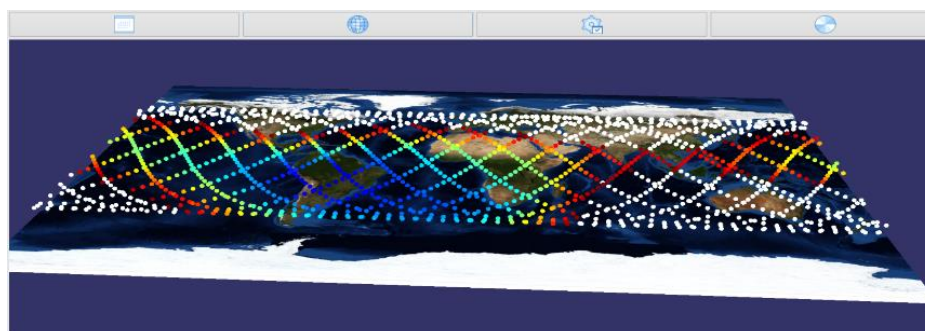


Рис. 7. Окно визуализации сети малых космических аппаратов в двумерном пространстве

Fig. 7. Visualization window for a network of small spacecraft in two-dimensional space

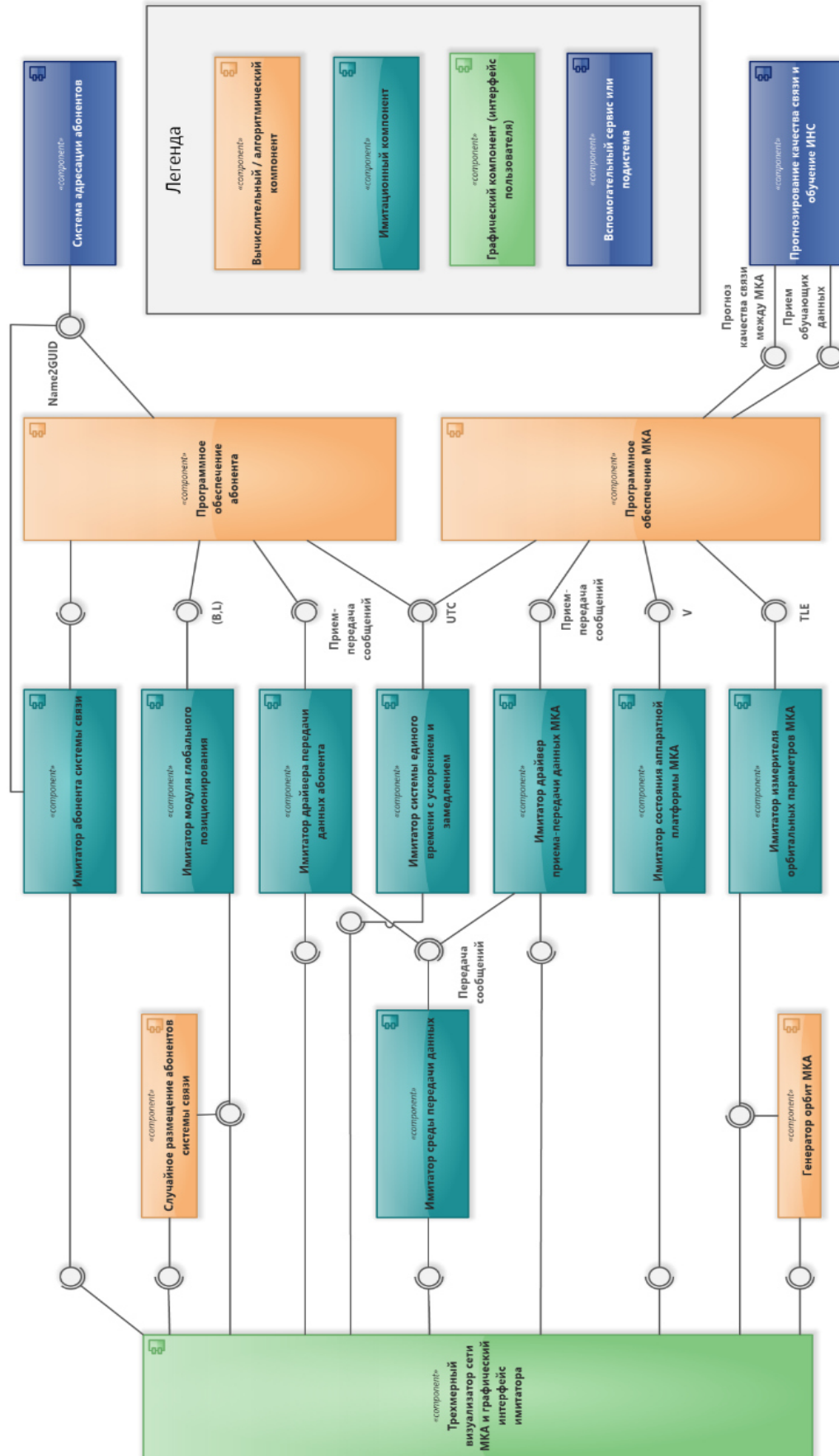


Рис. 8. Структура имитационной модели сети малых космических аппаратов

Fig. 8. Structure of the simulation model of a network of small spacecraft

Имитационная модель включает в себя следующие компоненты:

1. Трехмерный визуализатор сети МКА и графический интерфейс имитатора. Компонент предназначен для настройки параметров имитационного моделирования и отображения результатов на трехмерной модели геоида.

2. Генератор орбит МКА, позволяющий случайным образом создать заданное количество равномерно распределенных над поверхностью геоида начальных положений аппаратов, каждое из которых описывается геодезическими координатами, высотой над уровнем моря и начальным вектором движения. В процессе моделирования генератор способен имитировать «запуск» дополнительных МКА для включения в группировку.

3. Имитатор измерителя орбитальных параметров МКА. Обеспечивает расчет (TLE) параметров МКА на основе стартовых положений от генератора орбит.

4. Имитатор состояния аппаратной платформы МКА. Компонент имитирует старение аппаратной платформы МКА с заданным средним временем жизни. Возвращает вектор текущего состояния V заданных аппаратов.

5. Имитатор драйвера приема-передачи данных МКА и имитатор драйвера передачи данных абонента. Используют стандартные механизмы Q_i для организации связи и передачи данных между моделями МКА и абонентов.

6. Имитатор среды передачи данных. Предназначен для имитации ошибок и разрывов связи при передаче данных. Имеет два варианта моделей ошибки:

1) модель Маркова для переключения между «хорошим» и «плохим» режимами передачи данных (различаются битовой частотой ошибки, BER);

2) качество связи определяется исходя из наличия прямой видимости и нормированной гауссовской модели прохождения пакетов в зависимости от расстояния между парой МКА с нулевым математическим ожиданием и $\sigma = 2500$ км.

7. Имитатор системы единого времени с ускорением и замедлением. Предназначен для обеспечения единого системного времени группировки МКА и позволяет управлять скоростью моделирования.

8. Случайное размещение абонентов системы связи. Компонент аналогично размещению МКА позволяет случайным образом создать заданное количество равномерно распределенных на поверхности геоида абонентов сети связи МКА. В процессе имитационного моделирования способен добавлять абонентов в сеть.

9. Имитатор модуля глобального позиционирования. Выдает текущее значение геодезических координат с заданной ошибкой. В перспективе будет имитировать движение абонента.

10. Имитатор абонента системы связи. Компонент имитирует сеансы

связи, создаваемые с заданной частотой. Инициатор и адресат определяются по равномерному закону, средний интервал между сеансами и длительность – нормальный закон.

11. Программное обеспечение абонента и программное обеспечение МКА. Компоненты, обеспечивающие точки подключения для компонентов разрабатываемого сетевого ПО. На данный момент предоставляет минимально функциональные заглушки, имитирующие проактивный режим работы сети МКА, достаточные для моделирования.

Модель содержит два внешних компонента:

1. Компонент адресации абонентов, который обеспечивает получение уникального идентификатора абонента поттекстовому обозначению или по описанию (аналог сервиса Domain Name Service).

2. Компонент прогнозирования качества связи и обучение ИНС, который выполняет накопление кадров состояния сети МКА, обучение и дообучение ИНС, а также прогнозирование качества связи в заданном интервале времени для текущей конфигурации группировки МКА с использованием обученной ИНС.

Имитационная модель имеет два режима работы:

1. Сбор статистики качества связи для обучения нейронной сети. Использует только проактивный режим работы сети для измерения фактического качества связи для сбора кадров состояния

сети МКА и создания обучающей выборки.

2. Тестирование точности прогнозирования качества связи путем сопоставления результатов работы ИНС с фактическими значениями качества связи проактивного режима работы сети МКА, полученными в результате имитационного моделирования.

Выводы

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Разработан метод применения нейронной сети для прогнозирования возможных состояний сети малых космических аппаратов, который обеспечивает агрегирование и временную синхронизацию данных о состоянии сети МКА, их применение для обучения нейронной сети, а также использования нейронной сети для прогнозирования качества связи.

2. Создан формат обучающей выборки, основанный на представлении состояния сети МКА, которая обеспечивает генерацию начального состояния сети, моделирование проактивного режима её работы, сбор «кадров» состояния сети МКА для порождения наборов синтетических обучающих данных, в виде набора хронологических последовательностей, группируемых в кадры, и позволяющий снизить объем данных, передаваемых между МКА при создании выборки.

3. Разработана имитационная модель сети МКА, которая обеспечивает

генерацию начального состояния сети, моделирование проактивного режима ее работы, сбор «кадров» состояния сети МКА для порождения наборов синтетических обучающих данных, а также

позволяет проводить обучение и тестирование результатов работы нейронной сети для прогнозирования возможных состояний сети МКА.

Список литературы

1. Выбор архитектуры нейронной сети для реализации когнитивных функций сетевого программного обеспечения управления группировкой взаимодействующих малых космических аппаратов / Е. А. Шиленков, С. Н. Фролов, Е. А. Титенко, С. Ю. Мирошниченко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 8–26. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-8-26>
2. Аганесов А. В. Анализ качества обслуживания в воздушно-космической сети связи на основе иерархического и децентрализованного принципов ретрансляции информационных потоков // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 3. С. 92–121.
3. Оценка своевременности связи при передаче мультисервисного трафика в сети спутниковой связи специального назначения / Е. А. Новиков, Д. Р. Уткин, А. Г. Шадрин, М. Н. Квасов // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 1. С. 136–155.
4. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли / А. В. Соллогуб, П. О. Скобелев, Е. В. Симонова, А. В. Царев, М. Е. Степанов, А. А. Жилев // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1. С. 16–26.
5. Dynamic surface control for omnidirectional mobile robot with full state constraints and input saturation / C. Zhiqiang, A. Y. Krasnov, L. Duzhesheng, Y. Qiusheng // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2023. Vol. 23, no. 6. P. 1096–1105. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-6-1096-1105>
6. Alakshendra V., Chiddarwar S. S. Adaptive robust control of Mecanum-wheeled mobile robot with uncertainties // Nonlinear Dynamics. 2017. Vol. 87, N 4. P. 2147–2169. <https://doi.org/10.1007/s11071-016-3179-1>
7. Xi C., Dong J. Adaptive neural network-based control of uncertain nonlinear systems with time-varying full-state constraints and input constraint // Neurocomputing. 2019. Vol. 357. P. 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.04.060>
8. Dong C., Liu Y., Wang Q. Barrier Lyapunov function based adaptive finite-time control for hypersonic flight vehicles with state constraints // ISA Transactions. 2020. Vol. 96. P. 163–176. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.06.011>

9. Mofid O., Mobayen S. Adaptive finite-time backstepping global sliding mode tracker of quad-rotor UAVs under model uncertainty, wind perturbation, and input saturation // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2022. Vol. 58, N 1. P. 140–151. <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3098168>
10. Neural control of robot manipulators with trajectory tracking constraints and input saturation / C. Yang, D. Huang, W. He, L. Cheng // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2021. Vol. 32, N 9. P. 4231–4242. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2020.3017202>
11. Multi-robot mission planning with static energy replenishment / B. Li, B. Moridian, A. Kamal, S. Patankar, N. Mahmoudian // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2019. Vol. 95 (2). P. 745–759.
12. Guiding autonomous exploration with signal temporal logic / F. S. Barbosa, D. Duberg, P. Jensfelt, J. Tumova // IEEE Robotics and Automation Letters. 2019. Vol. 4, N 4. P. 3332–3339.
13. Robust collaborative object transportation using multiple MAVs / A. Tagliabue, M. Kamel, R. Siegwart, J. Nieto // International Journal of Robotics Research. 2019. Vol. 38 (9). P. 1020–1044.
14. A complete workflow for automatic forward kinematics model extraction of robotic total stations using the Denavit-Hartenberg convention / C. Klug, D. Schmalstieg, T. Gloor, C. Arth // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2018. Vol. 95. P. 311–329.
15. Калязина Д. М., Кашевник А. М. Разработка и оценка онтологии социкиберфизической системы на основе анализа типовых сценариев использования мобильных роботов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2019. № 2 (75). С. 21–36. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2019-2-21-36>
16. Assessing Contact Graph Routing Performance and Reliability in Distributed Satellite Constellations / J. A. Fraire, P. G. Madoery, S. Burleigh, M. Feldmann, J. Finochietto, A. Charif, N. Zergainoh, R. Velazcol // Journal of Computer Networks and Communications. 2017. N 6. P. 1–18.
17. Система автономной навигации малого космического аппарата / А. В. Аверьянов, К. А. Эсаулов, О. Е. Молчанов, Т. И. Белая // Известия вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 1. С. 14–17.
18. Карсаев О. В. Обзор традиционных и инновационных систем планирования миссий космических аппаратов // Информатика и автоматизация. 2016. № 5 (48). С. 151–182.
19. Prognostic model of formation of bronchopulmonary disposition in unemployed children / N. A. Gladskikh [et al.] // Sistem analisys and management in biomedical systems. 2017. Vol. 16, N 3. P. 632–637.

20. Гансвинд И. Н. Малые космические аппараты – новое направление космической деятельности // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. № 12-2 (78). С. 84–91. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.053>

References

1. Shilenkov E.A., Frolov S.N., Titenko E.A., Miroshnichenko S.Y. Selection of neural network architecture for implementing cognitive functions of network software for controlling a group of interacting small spacecraft. *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(4):8–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-8-26>
2. Aganesov A.V. Analysis of the quality of service in the aerospace communication network based on the hierarchical and decentralized principles of relaying information flows. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti. = Control, Communication and Security Systems*. 2015;(3):92–121. (In Russ.)
3. Novikov E.A., Utkin D.R., Shadrin A.G., Kvasov M.N. Assessing the timeliness of communication when transmitting multiservice traffic in a special-purpose satellite communication network. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Control, Communication and Security Systems*. 2018;(1):136–155. (In Russ.)
4. Sollogub A.V., Skobelev P.O., Simonova E.V., Tsarev A.V., Stepanov M.E., Zhi-lyayev A.A. Intelligent system for distributed control of group operations of a cluster of small-sized spacecraft in tasks of remote sensing of the Earth. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*. 2013;(1):16–26. (In Russ.)
5. Zhiqiang C., Krasnov A.Y., Duzhesheng L., Qiusheng Y. Dynamic surface control for omnidirectional mobile robot with full state constraints and input saturation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2023;23(6):1096–1105. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-6-1096-1105>
6. Alakshendra V., Chiddarwar S.S. Adaptive robust control of Mecanum-wheeled mobile robot with uncertainties. *Nonlinear Dynamics*. 2017;87(4):2147–2169. <https://doi.org/10.1007/s11071-016-3179-1>
7. Xi C., Dong J. Adaptive neural network-based control of uncertain nonlinear systems with time-varying full-state constraints and input constraint. *Neurocomputing*, 2019;357:108–115. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.04.060>
8. Dong C., Liu Y., Wang Q. Barrier Lyapunov function based adaptive finite-time control for hypersonic flight vehicles with state constraints. *ISA Transactions*. 2020;96:163–176. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.06.011>

9. Mofid O., Mobayen S. Adaptive finite-time backstepping global sliding mode tracker of quad-rotor UAVs under model uncertainty, wind perturbation, and input saturation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2022;58(1):140–151. <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3098168>
10. Yang C., Huang D., He W., Cheng L. Neural control of robot manipulators with trajectory tracking constraints and input saturation. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2021;32(9):4231–4242. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2020.3017202>
11. Li B., Moridian B., Kamal A., Patankar S., Mahmoudian N. Multi-robot mission planning with static energy replenishment. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2019;95(2):745–759.
12. Barbosa F.S., Duberg D., Jensfelt P., Tumova J. Guiding autonomous exploration with signal temporal logic. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019;4(4):3332–3339.
13. Tagliabue A., Kamel M., Siegwart R., Nieto J. Robust collaborative object transportation using multiple MAVs. *International Journal of Robotics Research*. 2019;38(9):1020–1044.
14. Klug C., Schmalstieg D., Gloor T., Arth C.A. complete workflow for automatic forward kinematics model extraction of robotic total stations using the Denavit-Hartenberg convention. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2018;95:311–329.
15. Kalyazina D.M., Kashevnik A.M. Development and evaluation of cyber-physical-social system ontology based on the analysis of typical scenarios for mobile robots interaction. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk State Technical University*. 2019;2(75):21–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2019-2-21-36>
16. Fraire J.A., Madoery P., Burleigh S., Feldmann M., Finochietto J., Charif A., Zergainoh N., Velazcol R. Assessing Contact Graph Routing Performance and Reliability in Distributed Satellite Constellations. *Journal of Computer Networks and Communications*. 2017;(6):1–18.
17. Averyanov A.V., Esaulov K.A., Molchanov O.E., Belaya T.I. Autonomous navigation system for a small spacecraft. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie = Proceedings of Universities. Instrument Making*. 2015;58(1):14–17.
18. Karsaev O.V. Review of traditional and innovative spacecraft mission planning systems. *Informatika i avtomatizatsiya = Computer Science and Automation*. 2016;(5):51–182.
19. Gladskikh N.A., et al. Prognostic model of formation of bronchopulmonary disposition in unemployed children. *Sistem Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2017;16(3):632–637.
20. Gansvind I.N. Small spacecraft – a new direction in space activities. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Scientific Research Journal*. 2018;(12-2):84–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.053>

Информация об авторах / Information about the Authors

Шиленков Егор Андреевич, кандидат технических наук, директор научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем имени Константина Эдуардовича Циолковского, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация
e-mail: ub3wcl@yandex.ru,
ORCID: 0000-0001-5855-4717

Egor A. Shilenkov, Candidate of Sciences (Engineering), Director of the Research Institute of Space Instrumentation and Radioelectronic Systems named after Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: ub3wcl@yandex.ru,
ORCID: 0000-0001-5855-4717

Фролов Сергей Николаевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем имени Константина Эдуардовича Циолковского, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация
e-mail: snfrolov@bk.ru,
ORCID: 0000-0002-6464-2462

Sergey N. Frolov, Candidate of Sciences (Engineering), Leading Researcher of the Research Institute of Space Instrumentation and Radioelectronic Systems named after Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: snfrolov@bk.ru,
ORCID: 0000-0002-6464-2462

Титенко Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем имени Константина Эдуардовича Циолковского, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: johntit@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-5659-4747

Evgeniy A. Titenko, Candidate of Sciences (Engineering), Leading Researcher of the Research Institute of Space Instrumentation and Radioelectronic Systems named after Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: johntit@mail.ru,
RCID: 0000-0002-5659-4747

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/>.