МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

Юго-Западного государственного университета

Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение

Научный журнал

Том 12 № 3 / 2022

Proceedings

of the Southwest State University

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

Scientific Journal

Vol. 12 № 3 / 2022

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).

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 Валерьевич, д-р мед. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (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);

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

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

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

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

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

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

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

Сизов Александр Семенович, д-р техн. наук, профессор, 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)

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, 2022

Материалы журнала доступны под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:
Полиграфический центр Юго-Западного государственного университета, 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

16+

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. В. Кофановой

Подписано в печать 30.09.2022. Формат 60x84/8.
Дата выхода в свет 08.11.2022.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 18,4.
Тираж 1000 экз. Заказ 51.

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 doctorial 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).

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);

Andrey V. Budnevsky, Dr. of Sci. (Medical), Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

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

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

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

Alexander S. Sizov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

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

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. Zhusubaliev, 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/

© Southwest State University, 2022

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

Printing office:
Printing Center
of the Southwest State University,
50 Let Oktyabrya str., 94,
Kursk 305040, Russian Federation

16+

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. V. Kofanova

Signed for printing 30.09.2022. Format 60x84/8.
Release date 08.11.2022.
Offset paper. Printer's sheets: 18,4.
Circulation 1000 copies. Order 51.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ **8**

Оригинальные статьи

Разработка автоматизированной системы мониторинга антигенов коронавирусной инфекции на основе иммунохроматографического анализа 8

Костарев С. Н., Файзрахманов Р. А., Новикова О. В., Комягина О. В., Середа Т. Г.

Разработка биотехнической системы для оценки и коррекции психофизиологического состояния человека 28

Петренко А. А., Кубланов В. С.

Разработка интеллектуальной системы для прогнозирования рисков сердечно-сосудистых заболеваний 46

Малышев А. В., Пузырев Е. И., Прохоров М. В., Нефедов Н. Г.

РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ **62**

Оригинальные статьи

Уточнение параметров отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории, измеренных средствами инерциальной навигации, по изображениям подстилающей поверхности 62

Андронов В. Г., Чуев А. А., Юдин И. С., Дубровский Н. С.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ **80**

Оригинальные статьи

Метод комплексной оценки уровня информативности классификационных признаков в условиях нечеткой структуры данных 80

Кореневский Н. А., Аксенов В. В., Родионова С. Н., Гонтарев С. Н., Лазурина Л. П., Сафронов Р. И.

Применение CUDA ядер в задачах обработки информации в базе данных при помощи BLAZINGSQL 97

Лапина Т. И., Филист С. А., Криушина Ю. А., Криушин Е. А.

Алгоритмы визуализации потоковых данных программ обработки медицинских сигналов в ОС WINDOWS 109

Кузьмин А. А., Мяснянкин М. Б., Маслак А. А., Филист С. А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ **126**

Оригинальные статьи

Система электронной аускультации: модель построения электронного стетоскопа 126

Макалов А. О., Смирнов В. А., Прохорцов А. В.

Моделирование размещения волоконно-оптической транспортной линии связи Курск – Железногорск 139

Томакова Р. А., Комаренко С. В., Степанов Д. А.

К сведению авторов **158**

CONTENT

INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS 8

Original articles

Development of Automated System for Monitoring of Coronavirus Antigens on the Basis of Immunochromatographic Analysis 8

Kostarev S. N., Fayzrakhmanov R. A., Novikova O. V., Komyagina O. V., Sereda T. G.

Development of a Biotechnical System for Assessment and Correction the Human Psychophysiological State ... 28

Petrenko A. A., Kublanov V. S.

The Program of the Cardiovascular Disease Risk Prediction System 46

Malyshev A. V., Puzyrev E. I., Prokhorov M. V., Nefedov N. G.

IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING 62

Original articles

Specification of Parameters of Deviations of Unmanned Aerial Vehicles from a Given Trajectory, Measured by Means of Inertial Navigation, from Images of the Underlying Surface 62

Andronov V. G., Chuev A. A., Yudin I. S., Dubrovsky N. S.

SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING 80

Original articles

Method of Complex Assessment of the Level of Information Content of Classification Features in the Conditions of Fuzzy Data Structure 80

Korenevskiy N. A., Aksenov V. V., Rodionova S. N., Gontarev S. N., Lazurina L. P., Safronov R. I.

Application of CUDA Kernel in the Processing of Information in the Database Using BLAZINGSQL..... 97

Lapina T. I., Filist S. A., Kriushina Y. A., Kriushin E. A.

Algorithms for Visualization of Streaming Data of Medical Signal Processing Programs in WINDOWS OS..... 109

Kuzmin A. A., Myasnyankin M. B., Maslak A. A., Filist S. A.

MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS 126

Original articles

Electronic Auscultation System: a Model for Building an Electronic Stethoscope 126

Makalov A. O., Smirnov V. A., Prokhortsov A. V.

Features of Construction (Modeling) of a Fiber-Optical Transport Line Kursk – Zheleznogorsk 139

Tomakova R. A., Komarenko S. V., Stepanov D. A.

Information for Authors 158

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-8-27

CC BY 4.0

Разработка автоматизированной системы мониторинга антигенов коронавирусной инфекции на основе иммунохроматографического анализа

С. Н. Костарев[1,2,3] ✉, Р. А. Файзрахманов[1], О. В. Новикова[2,3], О. В. Комягина[4], Т. Г. Середа[2]

[1] Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Комсомольский пр. 29, г. Пермь 614990, Российская Федерация

[2] Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова
ул. Петропавловская 23, г. Пермь 614990, Российская Федерация

[3] Пермский институт ФСИН России
ул. Карпинского 125, г. Пермь 614012, Российская Федерация

[4] Медицинское учреждение «Философия красоты и здоровья»
ул. КИМ 64, г. Пермь 614990, Российская Федерация

✉ e-mail: iums@dom.raid.ru

Резюме

Целью исследования *является разработка проекта прибора экспресс-анализатора на определение антигенов семейства коронавирусов.*
Методы. *Теоретические подходы при проектировании прибора экспресс-анализа были основаны на теории вирусологии, применении прикладной теории конечных автоматов, общей теории систем, статистического анализа, дифференциально-интегрального исчисления, теории множеств и графов. Анализ обнаружения антигенов CoV проходит в твердофазном иммунохроматографическом состоянии. Построение модели прибора и имитационное моделирование выполнено с помощью Software CX-One.*
Результаты*. В декабре 2019 г. в Китайской Народной Республике была обнаружена новая коронавирусная инфекция в городе Wuhan, вирусу было присвоено имя 2019-nCoV. В 2020 г. Мировая организация здравоохранения зарегистрировала пандемию, вызванную коронавирусной инфекцией, и классифицировала новый коронавирус как SARS-CoV-2. Конец 2021 г. характеризовался дальнейшей мутацией коронавируса и появлением штамма Омикрон. В марте 2022 г. был зафиксирован штамм омикрон BA.2 (стелс-омикрон), характер заболевания при котором также протекает по типу острого катарального синдрома или острого респираторного заболевания. Особенностью новых штаммов является более высокая скорость распространения, а также адаптация возбудителя к организму хозяина. В период 2022–2023 гг. ожидается появление новых штаммов коронавируса SARS-CoV-2, что делает разработку экспресс-анализатора актуальной.*

© Костарев С. Н., Файзрахманов Р. А., Новикова О. В., Комягина О. В., Середа Т. Г., 2022

Изучена методика экспресс-анализа инфицирования с помощью специальных диагностических щупов на основе вторичных иммобилизованных антител. Разработана технологическая карта проектируемого прибора. Разработаны логические уравнения и релейно-контактные схемы управления, реализованные на программно-аппаратном комплексе OMRON. Построение прибора экспресс-диагностики инфицирования коронавирусом позволит решить проблему по ускорению периода диагностики, снизить производственные, биологические риски у работников лаборатории, увеличить количество исследованных проб за единицу времени, тем самым улучшить эпидемиологическую обстановку.

***Заключение**. Экспресс-анализатор на наличие антигенов коронавируса позволит оперативно определять инфицирование на РНК коронавируса.*

***Ключевые слова:** коронавирус; ПЛС; релейно-контактная схема.*

***Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Пермского национального исследовательского политехнического университета в рамках Федеральной программы академического лидерства «Приоритет-2030».*

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

Для цитирования: Разработка автоматизированной системы мониторинга антигенов коронавирусной инфекции на основе иммунохроматографического анализа / С. Н. Костарев, Р. А. Файзрахманов, О. В. Новикова, О. В. Комягина, Т. Г. Середа // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 3. С. 8–27. https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-8-27.

Поступила в редакцию 07.06.2022 *Подписана в печать 15.07.2022* *Опубликована 30.09.2022*

Development of Automated System for Monitoring of Coronavirus Antigens on the Basis of Immunochromatographic Analysis

Sergey N. Kostarev[1,2,3] ✉, Rustam A. Fayzrakhmanov[2], Oksana V. Novikova[2,3], Oksana V. Komyagina[4], Tatyana G. Sereda[2]

[1] Perm National Research Polytechnic University
29 Komsomolski Ave., Perm 614990, Russian Federation

[2] Perm State Agrarian-Technological University named after academician D. N. Prianishnikov
23 Petropavlovskaja Str., Perm 614990, Russian Federation

[3] Perm Institute of the FPS of Russia
125 Karpinskogo Str., Perm 614012, Russian Federation

[4] Medical Institution "Philosophy of Beauty and Health"
64 KIM Str., Perm 614990 Russian Federation

✉ e-mail: iums@dom.raid.ru

Abstract

***The purpose of research** is the development of a project for an express analyzer device for the determination of antigens of the coronavirus family.*

Methods. *Theoretical approaches in the design of the express analysis device were based on the theory of virology, the application of the applied theory of finite automata, general systems theory, statistical analysis, differential-integral calculus, set and graph theory. The CoV antigen detection assay runs in a solid phase immuno-chromatographic state. The construction of the device model and the simulation of the program operation were performed using CX-One Software.*

Results. *At the end of 2019, an outbreak of a new coronavirus infection occurred in the People's Republic of China with an epicenter in the city of Wuhan, the causative agent of which was given the temporary name 2019-nCoV. In 2020, the World Health Organization registered a pandemic caused by a coronavirus infection and classified the new coronavirus as SARS-CoV-2. The end of 2021 was characterized by a further mutation of the coronavirus and the emergence of the Omicron strain. In March 2022, the Omicron BA.2 (stealth-Omicron) strain was recorded, the nature of the disease in which also proceeds according to the type of acute catarrhal syndrome or acute respiratory disease. A feature of the new strains is a higher reproduction rate. In the period 2022–2023, new strains of the SARS-CoV-2 coronavirus are expected to appear, which makes the development of an express analyzer relevant.*

A technique for express analysis of infection with the coronavirus family using special diagnostic probes based on the use of secondary immobilized antibodies has been studied. A technological map of the device being designed has been developed. Logic equations and relay-contact control circuits implemented on the OMRON software and hardware complex have been developed. The construction of a device for express diagnosis of coronavirus infection will solve the problem of safety, efficiency and reduce the epidemiological situation.

Conclusion. *The production of express analyzers for the presence of coronavirus antigens will make it possible to quickly determine infection on coronavirus RNA.*

Keywords: *SARS–CoV-2; PLC; Ladder Diagram.*

Funding: *The study was funded by Perm National Research Polytechnic University in the framework of the Federal Academic Leadership Program "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: Kostarev S. N., Fayzrakhmanov R. A., Novikova O. V., Komyagina O. V., Sereda T. G. Development of Automated System for Monitoring of Coronavirus Antigens on the Basis of Immunochromatographic Analysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022; 12(3): 8–27. (In Russ.) https://doi.org/ 10.21869/2223-1536-2022-12-3-8-27.

Received 07.06.2022 *Accepted 15.07.2022* *Published 30.09.2022*

***

Введение

Массовые заразные заболевания (эпидемии, пандемии), которые быстро охватывали большие территории и могут мигрировать из одной страны в другую, были изучены такими учеными, как Э. Дженнер, Луи Пастер, И. Мечников и др. Коронавирусы занимают одно из ведущих мест в патологии легких, желудочно-кишечных трактов и широко распространены во всем мире. Возбудители коронавирусов относятся к отряду Nidoviralec, семейству Coronaviridae, которое включает два подсемейства – Toroviridna (роды Torovirus и Bafinivirus) и Coronaviridna (роды Alphavirus, Betavirus, Gammavirus). Разделение последнего по родам (группам 1-3) основывалось на серологических перекрестных реакциях. Первая группа включает патогены, вызывающие заболевания у животных. Во вторую группу

входят патогены ветеринарного значения, такие как BCoV, гемагглютинирующий вирус энцефаломиелита свиней, коронавирус лошадей, вирусы инфицирующие мышей и крыс, а также человеческие коронавирусы, вызывающие поражение органов дыхания. Третья группа на сегодняшний момент включает только коронавирусы птиц. Свое название коронавирус получил из-за особого строения, коронаобразного внешнего вида, шиповидные отростки которого напоминают корону. У человека коронавирус впервые был выделен в 1965 г. от больного острым респираторным заболеванием. Появление сначала тяжелого острого респираторного синдрома в 2002 г., а затем ближневосточного респираторного синдрома в 2012 г. заставило специалистов существенно повысить уровень эпидемической опасности со стороны коронавирусов [1; 2]. Вопросы профилактики, диагностики и лечения новой коронавирусной инфекции (COVID-19) отражены в методических рекомендациях [3]. Разработке методик и тестов по диагностике SARS-COV-2 за последний период времени во всем мире уделяется большое внимание [4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11]. В работах [12; 13] обращено внимание на то, что от своевременной диагностики на обнаружение антигенов SARS-COV-2 зависит общественное здравоохранение, проводятся программы дополнительной подготовки врачей [14]. В настоящее время создаются программы для ЭВМ по выявлению мутаций и генотипирования вируса SARS-CoV-2 [15], количественного анализа по определению антител [16; 17]. В рамках стратегии импорта-замещения российские ученые разработали патент для выявления РНК вируса SARS-COV-2 [18]. В настоящее время на основе мутации коронавируса SARS-COV-2 появляются новые штаммы: омикрон (конец 2021 г.), стелс-омикрон (март 2022 г.). Новые штаммы коронавируса обладают более высокой скоростью репликации, тем самым требуя более быстрый мониторинг заболевания человека.

Материалы и методы

Натурные исследования были проведены на базе медицинского учреждения «Философия красоты и здоровья», г. Пермь. Моделирование и разработка прототипа программно-аппаратного комплекса экспресс-анализатора на антигены семейства коронавирусов ведется на базе центра робототехники Пермского политеха. Проектирование, программирование и симуляция проекта экспресс-анализатора было выполнено с использованием программно-аппаратного обеспечения CX-One для программируемого контроллера Omron, хорошо зарекомендовавшего себя в медицинской отрасли. В качестве индикаторов антигенов семейства коронавирусов предложено использовать набор диагностических щупов, представляющих собой нитроцеллюлозные мембраны, содержащие моноклональные антитела CoV. Программирование выполнено с

использованием ГОСТ Р МЭК 61131.3–2016. Работы проводились в соответствии с требованиями СП 1.3.318-13 (Безопасность работы с микроорганизмами I-II групп патогенности (опасности)) и Временными методическими рекомендациями «Профилактика, диагностика и лечение новой коронавирусной инфекции (COVID-19)» [3].

Результаты и их обсуждение

Построение инструментальной модели для исследования биосистемы «Коронавирус – Переносчик – Человек – Окружающая среда»

Предлагаемые модели представлены четырьмя элементами: *E* – природная среда, содержащая абиотические факторы (температура, влажность, вода, свет, биогенные вещества, атмосферные газы, эдофические факторы) и биотические факторы (факторы взаимодействия между особями одного и того же вида и факторы взаимодействия между особями различных видов); CoV – факторы, источники вирусов CoV, как правило, на зараженных объектах; V – переносчики, вступающие в контакт со всеми элементами представленной системы; P – реципиент, на которого взаимосвязано действуют все элементы системы. Реципиента от смертельного вирусного воздействия и связанных с ним патологий защищает два поля – мощность врожденного иммунитета и мощность приобретенного иммунитета (вакцинация). Исследования иммунологических аспектов при поражении коронавирусом приведены в работе [19]. В представленной системе важным процессом является адаптация живых организмов к среде, которая всегда развивается под действием трех факторов – изменчивости, наследственности и естественного отбора. Как правило, организмы адаптированы к постоянно действующим периодическим факторам, но в случае вмешательства человека в биологические процессы начинают действовать непериодические факторы, которые могут вызвать даже смерть живого организма, однако длительное воздействие периодических факторов может вызывать адаптацию, в частности бактерий и вирусов к антибиотикам и другим препаратам, приводящим к мутациям в их организме. Для развития коронавирусной инфекции необходим вирусный источник (CoV), переносщик (V) и реципиент (P). На вирусную активность и перенос вирусного облака также оказывает состояние окружающей среды (E). Граф состояний и переходов системы «CoV-E-V-P» показан ниже (рис. 1).

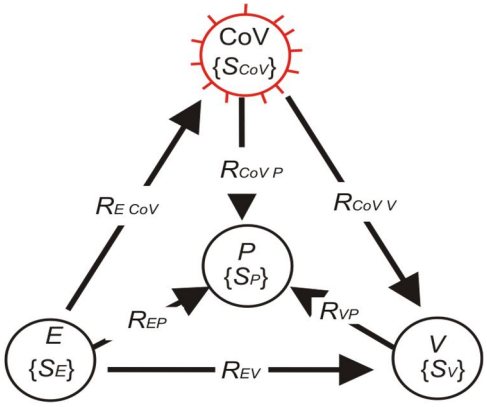


Рис. 1. Система (CoV-E-V-P)

Fig. 1. Chain (CoV-E-V-P)

При идентификации системы CoV-E-V-P введем определение состояния безопасности системы. Рассмотрим систему CoV-E-V-P как систему, осуществляющую отображение множеств X(t) на множество Y. Задача синтеза системы заключается в определении множества входных временных сигналов (см. рис. 1):

$$E\,R_E^{CoV}CoV,\ CoV\,R_{CoV}^{P}P,\quad V\,R_V^{P}P. \quad (1)$$
$$E\,R_E^{P}\,P,\qquad CoV\,R_{CoV}^{V}V,$$
$$E\,R_E^{V}V,$$

Разложим вектора R на бинарные множества R^0 (безопасное состояние системы) и R^1 (опасное состояние (инфицирование коронавирусом)) [20]:

$$YR^0\left[X(t),C\right],CR^1X(t). \quad (2)$$

Элементы C описывают память системы на основе полумарковских процессов. С учетом выражения (2) система выражений (1) разложится на две подсистемы (3) и (4):

$$ER_E^{CoV0}[C_E^{CoV},\ CoV^1],\ C_E^{CoV}R_{E\,CoV}^{1}CoV^1;$$
$$ER_E^{P0}[C_E^{P},\ P^0],\ C_E^{P}R_E^{P1}P^1;$$
$$ER_E^{V0}[C_E^{V},\ V^0],\ C_E^{V}R_E^{V1}V^1;$$
$$CoV\,R_{CoV}^{P0}[C_{CoV}^{P},\ P^0],\ C_{CoV}^{P}R_{CoV}^{P1}P^1;$$
$$CoV\,R_{CoV}^{V0}[C_{CoV}^{V},\ V^0],\ C_{CoV}^{V}R_{CoV}^{V1}V^1. \quad (3)$$

$$V\,R_V^{P\,0}[C\,R_V^{P},\ P^0],\ C_V^{P}R_V^{P\,1}P^1. \quad (4)$$

Общее состояние системы CoV-E-V-P будет описываться функцией

$$C_{COV\text{-}E\text{-}V\text{-}P}=\Phi[C_P,\ C_V,\ C_E,\ C_{CoV}]. \quad (5)$$

Рассмотрим изменение состояний системы (5) от параметров ее элементов.

Состояние безопасности человека C_P зависит от его собственных свойств S_P: здоровья, иммунитета, параметров окружающей среды (C_P^E), наличия и вирулентности коронавирусов (C_P^{CoV}) и активности переносчика (C_P^V):

$$C_P=\Phi_1[\{S_P\},\ C_P^{CoV},\ C_P^{E},\ C_P^{V}]. \quad (6)$$

Состояние переносчика C_V зависит от собственных свойств переносчика SV, скорости распространения и вирулентности коронавирусов (C_V^{CoV}), состояния окружающей среды (C_V^E):

$$C_V=\Phi_2[\{S_V\},\ C_V^{CoV},\ C_V^{E}]. \quad (7)$$

Состояние окружающей среды CE зависит от собственных свойств среды SE, скорости движения воздуха (рассеивания в воздухе коронавирусов) (C_E^{SP}), температуры (C_E^T) и влажности (C_E^W):

$$C_E=\Phi_3[\{S_E\},\ C_E^{SP},\ C_E^{T},\ C_E^{W}]. \quad (8)$$

Состояние CoV зависит от собственных свойств коронавируса S_{CoV} и влияния параметров окружающей среды на скорость распространения инфекции:

$$C_{CoV}=\Phi_4[\{S_{CoV}\},\ C_{CoV}^{E}]. \quad (9)$$

Изменение состояния здоровья (H) человека (P) опишется зависимостью

$$C_P=\Delta H_P(S_P)+\Delta H_P(CoV)+$$
$$+\Delta H_P(E)+\Delta H_P(V), \quad (10)$$

где $\Delta H_P(S_P)$ – изменение показателя здоровья от индивидуальных особенностей человека; $\Delta H_P(CoV)$ – изменение показателя здоровья человека от штамма коронавируса; $\Delta H_P(E)$ – изменение показателя здоровья человека от влияния параметров окружающей среды; $\Delta H_P(V)$ – изменение показателя здоровья человека от влияния переносчика.

Под индивидуальными свойствами безопасности и здоровья человека

можно понимать иммунитет (Im), отсутствие побочных заболеваний (Dis), использование средств защиты дыхания (Br) и норм гигиены (Hy):

$$\Delta H_P(S_P)=\frac{\partial H_P}{\partial S_{Im}}\Delta S_{Im}+\frac{\partial H_P}{\partial S_{Dis}}\Delta S_{Dis}+ +\frac{\partial H_P}{\partial S_{Br}}\Delta S_{Br}+\frac{\partial H_P}{\partial S_{Hy}}\Delta S_{Hy}. \quad (11)$$

От параметров природной среды сильно зависит активность коронавируса, например температуры (Tm), влажности (Hm), скорости ветра (Sp), излучения солнца (Sun):

$$\Delta H_P(E)=\frac{\partial H_P}{\partial E_{Tm}}\Delta E_{Tm}+\frac{\partial H_P}{\partial E_{Hm}}\Delta E_{Hm}+ +\frac{\partial H_P}{\partial E_{Sp}}\Delta E_{Sp}+\frac{\partial H_P}{\partial(Sun)}\Delta(Sun). \quad (12)$$

Наличие семейства коронавирусов является основным опасным источником инфицирования для человека:

$$\Delta H_P(CoV)=\frac{\partial H_P}{\partial SARS\text{-}CoV_2}\Delta SARS-CoV_2+ +\frac{\partial H_P}{\partial CoV_{SARS}}\Delta CoV_{SARS}+\frac{\partial H_P}{\partial CoV_{MERS}}\Delta CoV_{MERS}.$$

Переносчик вируса является важным элементом при инфицировании, например, человек без средств защиты органов дыхания (1), высокой мобильности с пересечением географических поясов и стран (2), возраст (3) и контакты по работе (с врачами, учителями и другими) (4):

$$\Delta H_P(V)=\frac{\partial H_P}{\partial V_1}\Delta V_1+\frac{\partial H_P}{\partial V_2}\Delta V_2+ +\frac{\partial H_P}{\partial V_3}\Delta V_3+\frac{\partial H_P}{\partial V_4}\Delta V_4. \quad (13)$$

Переносчик заболевания является важным, можно сказать, основным звеном мобильности коронавируса. В качестве переносчика инфекции может выступать инфицированный человек даже без признаков заболевания, а также помещения, самолеты, поезда, автобусы, которыми пользовался переносчик. Изменение состояния безопасности переносчика (V) опишется зависимостью

$$C_V = \Delta H_V(S_V) + \Delta H_V(CoV) + \Delta H_V(E), \quad (14)$$

где $\Delta H_V(S_V)$ – изменение показателя безопасности от собственных свойств переносчика, если под переносчиком понимать человека, то изменение свойств опишется уравнением

$$\Delta H_P(S)=\frac{\partial H_V}{\partial S_{Im}}\Delta S_{Im}+\frac{\partial H_V}{\partial S_{Dis}}\Delta S_{Dis}+ +\frac{\partial H_V}{\partial S_{Br}}\Delta S_{Br}+\frac{\partial H_V}{\partial S_{Hy}}\Delta S_{Hy}. \quad (15)$$

где $\Delta H_V(CoV)$ – изменение показателя безопасности переносчика от влияния коронавируса;

$\Delta H_V(E)$ – изменение показателя безопасности переносчика от влияния параметров среды.

Дифференциальные уравнения изменения показателя безопасности переносчика опишем также подобным способом:

$$\Delta H_V(CoV)=\frac{\partial H_V}{\partial SARS\text{-}CoV_2}\Delta SARS-CoV_2+\frac{\partial H_V}{\partial CoV_{SARS}}\Delta CoV_{SARS}+\frac{\partial H_V}{\partial CoV_{MERS}}\Delta CoV_{MERS};$$

$$\Delta H_V(E)=\frac{\partial H_V}{\partial E_{Tm}}\Delta E_{Tm}+\frac{\partial H_V}{\partial E_{Hm}}\Delta E_{Hm}+\frac{\partial H_V}{\partial E_{Sp}}\Delta E_{Sp}. \quad (16)$$

Используя предлагаемые модели и при наличии информации о параметрах вирулетности коронавируса, можно определить безопасность системы «Человек – Переносчик – Коронавирус – Окружающая среда».

Структура вириона SARS-CoV-2 и сравнительный анализ штаммов коронавирусов SARS-CoV-2, SARS-CoV и MERS-CoV описаны в работе [21]. Особую опасность представляет штамм SARS-CoV-2, обладающий высокой деструктивной особенностью модификации элементов нуклеиновых кислот, клеточной деградацией, расщеплением полипептидов и других функций. Геном SARS-CoV-2 хранится в файлах формата *.fasta, *.fa, *.fas и *.fna, представляющих кодировку нуклеотидных последовательностей [22]. Штамм SARS-COV-2 в связи с большим размером генома обладает сильной мутацией, в 2021 г. большую опасность представлял дельта-штамм, в 2022 г. наблюдаются мутации штамма Омикрон.

Рассмотрим математическую модель мутации деструктивных функций шестнадцати неструктурных и структурных белков (нсб) коронавируса штамма SARS-CoV-2:

$$\Delta V_{\text{SARS-CoV2}}(\text{нсб}) = \frac{\partial v_\beta}{\partial(\text{нсб}_1)}\Delta\text{нсб}_1 + \frac{\partial v_\beta}{\partial(\text{нсб}_2)}\Delta\text{нсб}_2 + \frac{\partial v_\beta}{\partial(\text{нсб}_3)}\Delta\text{нсб}_3 + \frac{\partial v_\beta}{\partial(\text{нсб}_4)}\Delta\text{нсб}_4 +$$
$$+\frac{\partial v_\beta}{\partial(\text{нсб}_5)}\Delta\text{нсб}_5 + \frac{\partial v_\beta}{\partial(\text{нсб}_6)}\Delta\text{нсб}_6 + \frac{\partial v_\beta}{\partial(\text{нсб}_7)}\Delta\text{нсб}_7 + \frac{\partial v_\beta}{\partial(\text{нсб}_8)}\Delta\text{нсб}_8 + \frac{\partial v_\beta}{\partial(\text{нсб}_9)}\Delta\text{нсб}_9 +$$
$$+\frac{\partial v_\beta}{\partial(\text{нсб}_{10})}\Delta\text{нсб}_{10} + \frac{\partial v_\beta}{\partial(\text{нсб}_{11})}\Delta\text{нсб}_{11} + \frac{\partial v_\beta}{\partial(\text{нсб}_{12})}\Delta\text{нсб}_{12} + \frac{\partial v_\beta}{\partial(\text{нсб}_{13})}\Delta\text{нсб}_{13} +$$
$$+\frac{\partial v_\beta}{\partial(\text{нсб}_{14})}\Delta\text{нсб}_{14} + \frac{\partial v_\beta}{\partial(\text{нсб}_{15})}\Delta\text{нсб}_{15} + \frac{\partial v_\beta}{\partial(\text{нсб}_{16})}\Delta\text{нсб}_{16},$$

где нсб $_1$ – деградация mРНК; нсб$_2$ – в настоящее время недостаточно изучена; нсб$_3$, нсб $_5$ – деградация полипептидов; нсб$_4$, нсб$_6$ – формирование двухмембранной везикулы для репликации вируса; нсб $_7$, нсб$_8$, нсб$_{12}$ – модификация РНК; нсб$_9$ – димеризация РНК; нсб$_{10}$, нсб$_{14}$ и нсб$_{16}$ – сенсоры; нсб$_{11}$ – в настоящее время недостаточно изучена; нсб$_{13}$, nsp$_{15}$ – разрушение и деградация РНК.

Расшифрование полного генома коронавируса представляет длительную процедуру и для поиска определенных нуклеотидных последовательностей создаются щупы, содержащие моноклональные антитела штаммов коронавируса, которые можно использовать для разработки автоматизированной системы [23; 24].

Построение автоматизированной системы по мониторингу штаммов коронавирусов

Для построения прибора экспресс-диагностики заболевания и инфицирования семейством коронавирусов CoV необходимо определить симптомы заболевания с последовательным уточнением диагноза. Первичными симптомами заболевания обычно выступают повышенная температура, ломота в костях, раздражение дыхательных путей, после чего необходимо поставить диагноз заболевания.

Возбудитель передается аэрозольным, фекально-оральным и контактным путем. Как правило, коронавирусы вызывают поражение дыхательных путей и желудочно-кишечного тракта. Особенностью штамма омикрон являлось преимущественно поражение верхних дыхательных путей в отличие от штамма дельта. Инкубационный период в среднем продолжается 2–7 суток, в ряде случаев достигает 10 суток. Обобщенная клиническая последовательность внешнего проявления коронавируса составляет несколько этапов (табл. 1).

Таблица 1. Клиническая картина симптомов заболевания

Table 1. External manifestation of the symptoms of the disease

Этап / Phase	Период / Stage	Симптом заболевания / External manifestation
0	Инкубационный период	Не проявляется
1	Начало болезни	Боль в костях, температура тела повышается до 38-39 °C
2	Респираторная фаза с выраженными признаками поражения дыхательных путей	Кашель, одышка, возникает чувство нехватки воздуха
3	Поражения желудочно-кишечного тракта	Тошнота, рвота, диарея

Проведя анализ экспресс-методики определения антигенов коронавируса, была составлена технологическая карта, включающая шесть модулей: 1 модуль – подготовка жидкой среды биоматериала; 2 модуль – определение характерного вида CoV для исследуемого объекта и настройка магазина; 3 модуль – диагностика антигенов коронавируса с помощью специального щупа; 4 модуль – технологический перерыв; 5 модуль – анализ индикаторов и постановка диагноза по инфицированию исследуемой биосреды; 6 модуль – промывка и дезинфекция контейнера.

Контейнер предназначен для загрузки биоматериала для исследования. Задача привода управления контейнером заключается в доставке биоматериала в модуль диагностики. Положение контейнера имеет два устойчивых состо-

яния – открытое и закрытое, фиксируемые датчиками. Граф состояний и переходов управления приводом контейнера показан ниже (рис. 2).

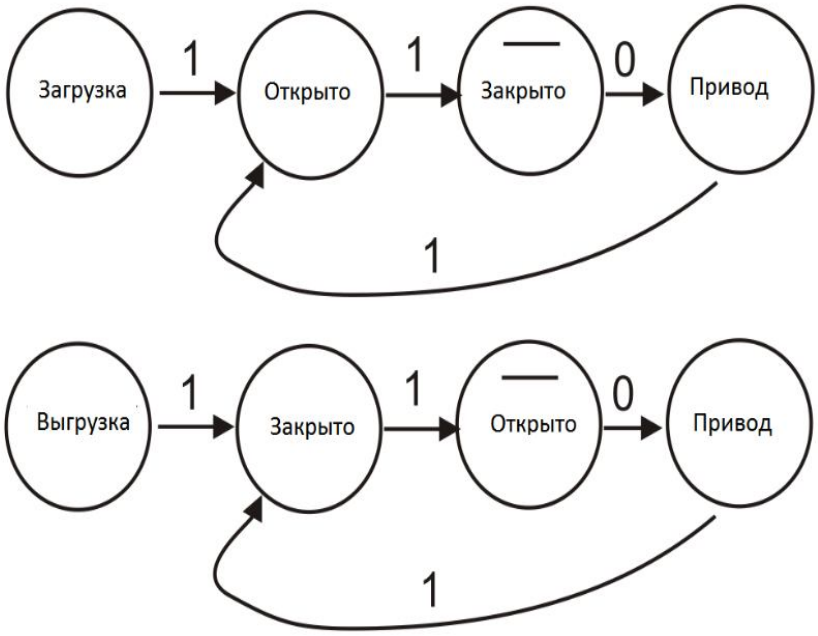


Рис. 2. Управление приводом контейнера («Закрыто», «Открыто» – конечные датчики; «Загрузка», «Выгрузка» – управляющие переключатели)

Fig. 2. Container drive control ("Closed", "Open" – end sensors; "Loading", "Unloading" – control switches)

Магазин тест-кассет представляет механизм с установленным диагностическим материалом. В качестве индикатора CoV-антител предлагается использовать набор диагностических щупов. Щуп представляет собой нитроцеллюлозную мембрану. Управление приводом магазина заключается в установке определенного положения для диагностики предполагаемого антигена коронавируса. Граф состояний и переходов управления приводом магазина тест-щупов показан ниже (рис. 3).

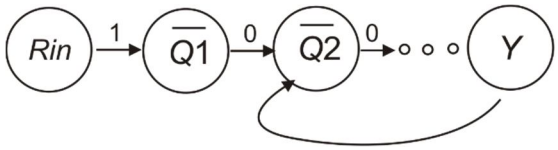


Рис. 3. Управление магазином тест-кассет: Rin – активация магазина; Qx – выбор теста; Y – сервопривод

Fig. 3. Probe control: Rin – store activation; Qx – choice of test; Y – servo

Нормальное положение диагностического щупа – в магазине, при анализе в щуп загружается исследуемая проба мазка, и щуп перемещается в анализатор, оснащенный техническим зрением. Граф состояний и переходов управления щупом показан ниже (рис. 4).

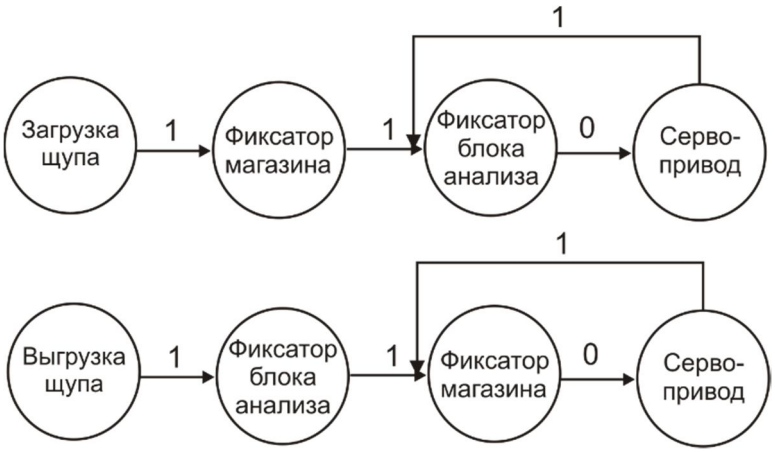


Рис. 4. Управление щупом

Fig. 4. Probe control

Модуль 5 необходим для диагностики инфицирования коронавирусом. После забора проб биомассы и выбора искомого антигена коронавируса происходит управление магазином с установленными экспресс-тестами. Результаты диагностики могут показать положительную или отрицательную реакцию, а также быть неточными или недействительными, исходя из показаний детекторных сигналов. Щуп представляет собой мембрану, содержащую моноклональные антитела, выдающие тестовый «Т» и/или контрольный сигналы «С». Результат анализа может принять четыре состояния: отрицательное (–), положительное (+), сомнительное (С) и недействительное (Н). Рассмотрим связь индикаторов «Т» и «С» и результатов анализа (табл. 2).

Таблица 2. Таблица истинности

Table 2. Table truth

Датчики мониторинга / Sensors monitoring		Результаты анализа / Results analysis			
T	C	–	+	C	H
L	L	L	L	L	T
L	T	L	T	L	L
T	L	L	L	T	L
T	T	T	L	L	L

Также были построены системы управления модулями 4 и 6:

– модуль 4 – технологический перерыв, необходимый для прохождения реакции и формирования иммунохроматографического ответа. Реализуется за счет настройки таймера на определенное время;

– модуль 6 – управление форсункой с обеззараживающей жидкостью и обработка биопроб озоном.

Синтез логических уравнений проведен с получением минимальной дизъюнктивной нормальной формы. Программа разработана на основе ГОСТ Р МЭК 61131.3–2016. Мнемоника компьютерной программы прибора показана ниже (рис. 5).

Rung	Step	Instruction	Operand	Value	Comment
0	0	LD	Start_On		
	1	OR	400.00		Start
	2	ANDNOT	10.03		Stop
	3	OUT	400.00		Start
1	4	LD	1.01		
	5	OR	300.00		Yon
	6	AND	Open		
	7	ANDNOT	8.02		Close
	8	OUT	300.00		Yon
2	9	LD	Testoff		
	10	OR	301.00		Yoff
	11	ANDNOT	Open		
	12	AND	8.02		Close
	13	OUT	301.00		Yoff
3	14	LD	7.00		Reel
	15	OR	200.00		
	16	ANDNOT	Q1		CoV-229E
	17	ANDNOT	Q2		CoV-NL63
	18	ANDNOT	Q3		CoV-HKU1
	19	ANDNOT	Q4		CoV-OC43
	20	ANDNOT	Q5		SARS-CoV
	21	OUT	2.01		
4	22	LD	2.01		
	23	ANDNOT	Q6		MERS-CoV
	24	ANDNOT	Q7		2019-nCoV
	25	ANDNOT	Q8		IBV
	26	ANDNOT	Q9		ISU-1
	27	ANDNOT	Q10		PUR46-MAD
	28	OUT	Y		
5	29	LD	5.00		Test_on
	30	OR	Yts		Testing
	31	AND	5.02		Top
	32	ANDNOT	5.03		Bottom
	33	OUT	Yts		Testing

Rung	Step	Instruction	Operand	Value	Comment
6	34	LD	Testoff		
	35	OR	Ytsoff		
	36	ANDNOT	5.02		Top
	37	AND	5.03		Bottom
	38	OUT	Ytsoff		
7	39	%LD	Ytsoff		
	40	TIM	0001		
			5000		
8	41	LDNOT	Y		
	42	OUT	TR0		
	43	AND	T		
	44	AND	C		
	45	OUT	Zp		CoV
	46	LD	TR0		
	47	ANDNOT	T		
	48	AND	C		
	49	OUT	Zn		Negative
	50	LD	TR0		
	51	AND	T		
	52	ANDNOT	C		
	53	OUT	Zd		Doubtful
	54	LD	TR0		
	55	ANDNOT	T		
	56	ANDNOT	C		
	57	OUT	Znv		Not valid
9	58	LD	Y		
	59	OR	109.00		Dispencer
	60	AND	T0000		
	61	AND	6.06		ER
	62	OUT	109.00		Dispencer
10	63	LD	109.00		Dispencer
	64	TIM	0000		
			#600		
11	65	LD	8.00		LD
	66	OR	300.00		Yon
	67	AND	Open		
	68	ANDNOT	8.02		Close
	69	OUT	300.00		Yon
12	70	LD	Testoff		
	71	OR	301.00		Yoff
	72	ANDNOT	Open		
	73	AND	8.02		Close
	74	OUT	301.00		Yoff

Рис. 5. Мнемоника компьютерной программы

Fig. 5. Program mnemonic

Для построения модели прибора экспресс-анализатора выбран PLC Omron, хорошо зарекомендовавший себя в медицинской сфере использования. Программное обеспечение выполнено с использованием системы CX-One (CX-Programmer и CX-Designer). Рассмотрим разработанный интерфейс лаборанта оператора прибора экспресс-анализатора (рис. 6). Интерфейс включает управление блоками: загрузки/выгрузки и обезвреживания биопроб, магазина тестов и тестовых сигналов. На панели прибора также находится табло выдачи результатов. Симуляция работы системы экспресс-анализа необходима для проверки правильности работы модулей прибора.

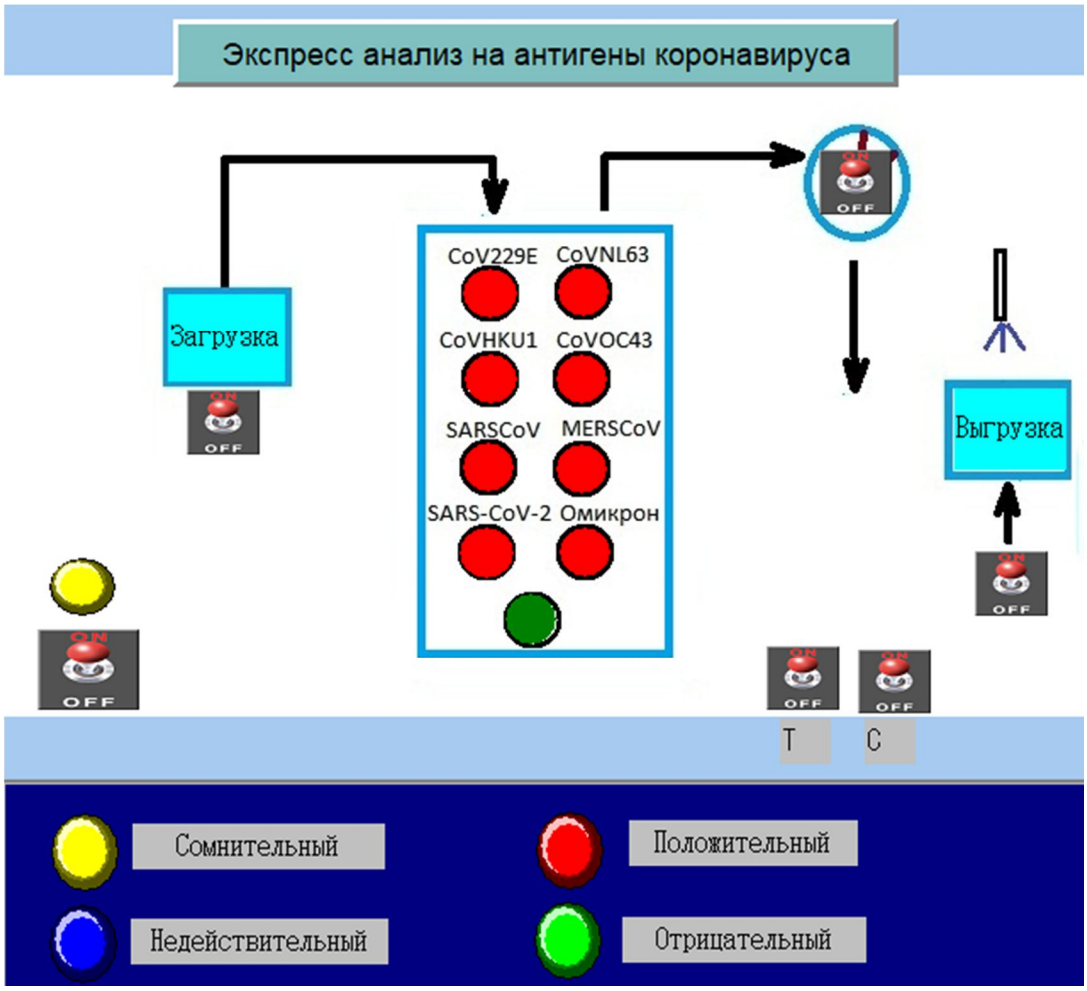


Рис. 6. Проект панели прибора экспресс-анализатора

Fig. 6. Express analyzer instrument panel project

Описание работы схемы диагностики экспресс-анализа на примере определения антигенов штамма коронавируса омикрон приведено ниже (рис. 7).

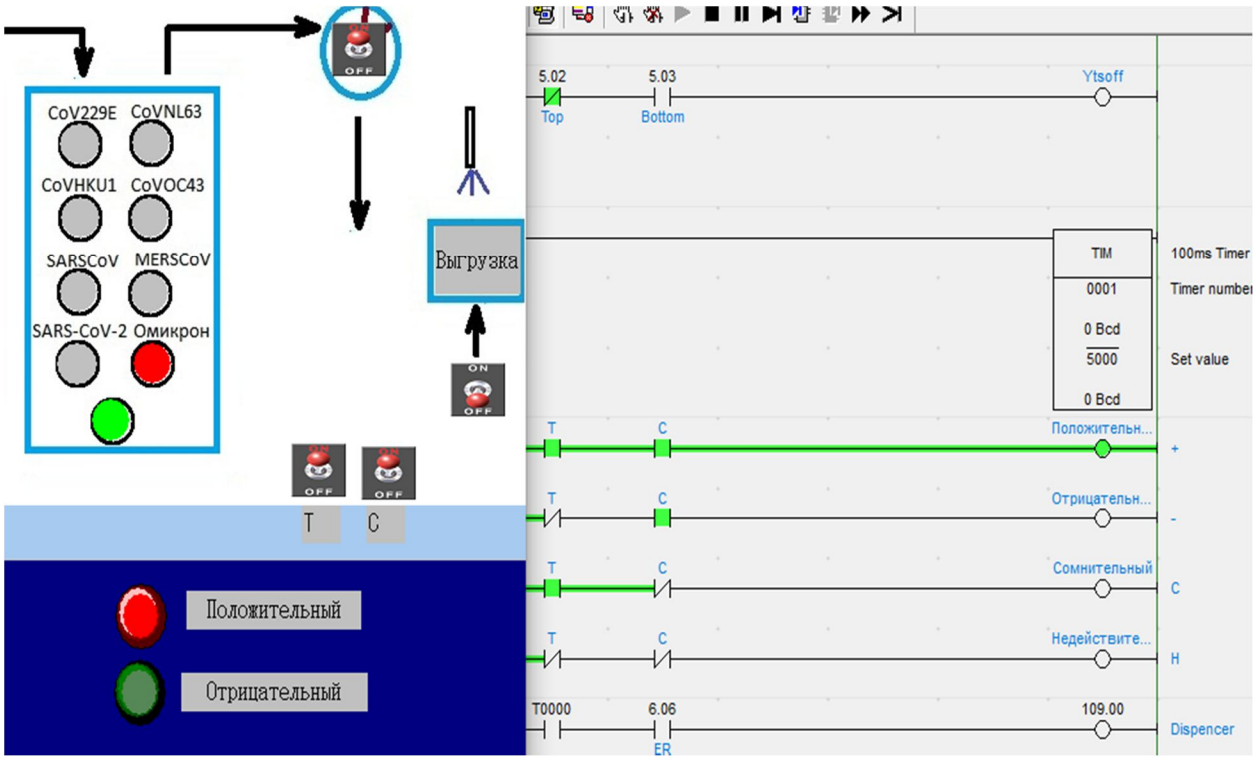


Рис. 7. Активирование сигналов «Т» и «С» (положительная реакция). Активирование сигналов омикрон и CoV (обнаружение антигена коронавируса штамма омикрон)

Fig. 7. Activation of the "T" and "C" signals (positive reaction). Activation of omicron and CoV signals (detection of omicron strain coronavirus antigen)

Симуляция работы программы экспресс-анализа была проверена для каждого модуля и показала правильную логику работы тест-системы и индикации сигналов на проектируемой панели прибора, а также и остальных модулей проектируемого прибора.

Выводы

В работе изучены вопросы определения первичных симптомов заболевания человека при инфицировании коронавирусом. Для ускорения постановки диагноза заболевания и повышения безопасности работы медицинских работников предложена разработка проекта устройства экспресс-анализа по установлению состояния инфицирования коронавирусом. Изучена методика экспресс-анализа инфицирования семейством коронавирусов с помощью специальных диагностических щупов на основе использования вторичных иммобилизованных антител. Разработана технологическая карта проектируемого прибора. Разработаны логические релейно-контактные схемы управления, реализованные для программируемого логического контроллера. Построение прибора экспресс-диагностики инфицирования коронавирусом позволит решить проблему по ускорению периода диагно-

стики, снизить производственные, биологические риски у работников лаборатории, увеличить количество исследованных проб за единицу времени, тем самым улучшить эпидемиологическую обстановку.

Список литературы

1. Щелканов М. Ю., Колобухина Л. В., Львов Д. К. Коронавирусы человека (Nidovirales, Coronaviridae): возросший уровень эпидемической опасности // Лечащий врач. 2013. № 10. С. 49.

2. Грипп (сезонный, птичий, пандемический) и другие ОРВИ / под ред. проф. В. П. Малого, проф. М. А. Андрейчина. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2013. 320 с.

3. Временные методические рекомендации. Профилактика, диагностика и лечение новой коронавирусной инфекции (COVID-19). Версия 7 (03.06.2020). URL: https://legalacts.ru/doc/vremennye-metodicheskie-rekomendatsii-profilaktika-diagnostika-i-lechenie-novoi-koronavirusnoi_4/ (дата обращения: 14.05.2022).

4. Перевезенцев О. А., Холодная Т. О., Бурцев Д. В. Зарубежный опыт молекулярно-генетической и иммунологической диагностики SARS-CoV-2 (Обзор) // Лабораторная служба. 2021. Т. 10, № 4. С. 47-54.

5. Шанчев А. А. Роль КДЛ в диагностике и лечении пациентов с SARS-CoV-2 // Справочник заведующего КДЛ. 2020. № 6. С. 51-56.

6. Григорьева Т. Д., Фалилеева М. Ю., Горохова А. И. Определение антител класса IGG к SARS-CoV-2 методом ИФА: мнения лаборанта и эксперта // Справочник заведующего КДЛ. 2021. № 1. С. 36-40.

7. Мультимодальная дифференциальная диагностика вирусной пневмонии в условиях пандемии SARS-CoV2 (клиническое наблюдение) / А. В. Борсуков [и др.] // Медицинский алфавит. 2021. № 13. С. 31-35. https://doi. org/10.33667/2078-5631-2021-13-31-35.

8. Diagnostic performance and characteristics of anterior nasal collection for the SARS-CoV-2 antigen test: a prospective study / Y. Takeuchi [et al.] // Scientific Reports. 2021. Vol. 11 (1). P. 10519.

9. Accurate SARS-CoV-2 seroprevalence surveys require robust multi-antigen assays / C. Fotis [et al.] // Scientific Reports. 2021. Vol. 11 (1). P. 6614.

10. Quantifying the potential value of antigen-detection rapid diagnostic tests for COVID-19: a modelling analysis / S. Ricks [et al.] // BMC Medicine. 2021. Vol. 19 (1). P. 75.

11. Analysis of SARS-CoV-2 antibodies in COVID-19 convalescent blood using a coronavirus antigen microarray / R. R. de Assis [et al.] // Nature Communications. 2021. Vol. 12 (1). P. 6.

12. Evaluation of SARS-CoV-2 antigen-based rapid diagnostic kits in Pakistan: formulation of COVID-19 national testing strategy / U. Saeed [et al.] // Virology Journal. 2021. Vol. 18 (1). P. 34.

13. Kowada A. Greater public health impact of COVID-19 antigen detection tests // BMC Medicine. 2021. Vol. 19 (1). P. 82.

14. Особенности реализации программы дополнительной подготовки врачей по специальности «Анестезиология-реаниматология», «Интенсивная терапия осложненных форм новой коронавирусной инфекции» / А. Ю. Сморкалов [и др.] // Виртуальные технологии в медицине. 2020. № 2 (24). С. 42-47.

15. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022612845. Polymorphism analysis of russian SARS-COV-2 (PARUS) / С. О. Синицын [и др.]. № 2022611757; заявл. 11.02.22; опубл. 01.03.22.

16. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021667302. Программа для автоматизации анализа серологических маркеров антител иммуноглобулинов IGG и IGM COVID-19 (Экспресс-анализ антител IGG И IGM COVID-19) / С. Н. Костарев, О. В. Кочетова, С. О. Синицын, Т. Г. Середа. № 2021666591; заявл. 20.10.21; опубл. 27.10.21.

17. Разработка системы автоматического диагноза на наличие антител иммуноглобулинов IGG и IGM SARS-CoV-2 / С. Н. Костарев, О. В. Кочетова, Н. А. Татарникова, Т. Г. Середа // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 2. С. 8-24.

18. Пат. 2764023 C1 Российская Федерация. Система CRISPR-CAS12 для выявления РНК вируса SARS-COV-2 в ультра-низких концентрациях / А. И. Тюменцев [и др.]. № 2021128583; заявл. 30.09.21; опубл. 12.01.22.

19. Иммунологические аспекты поражения коронавирусом SARS-CoV-2 / Т. И. Миннуллин [и др.] // Вестник Российской Военно-медицинской академии. 2021. № 2 (74). С. 187-198.

20. Курош А. Г. Курс высшей алгебры. СПб.: Лань, 2006. 432 с.

21. Хусанов Х. И., Шевкопляс Л. А. Сравнительный анализ SARS-COV-2, SARS-COV И MERS-COV // Инновации. Наука. Образование. 2020. № 21. С. 1597–1607.

22. UniProt. URL: https://www.uniprot.org/proteomes/UP000464024 (дата обращения: 18.05.2022).

23. Акиншина Ю. А., Марданлы С. С., Киселева В. А. Иммунохроматографическая тест-система для дифференцированного выявления антител классов M и G к коронавирусу SARS-COV-2 // Известия ГГТУ. Медицина, фармация. 2020. № 3. С. 12-16.

24. Акиншина Ю. А., Марданлы С. С., Киселева В. А. Иммунохроматографический тест для дифференцированного выявления антител классов M и G к коронавирусу SARS-COV-2 // Клиническая лабораторная диагностика. 2020. Т. 65, № 11. С. 688-692.

References

1. Shchelkanov M. Yu., Kolobukhina L. V., Lvov D. K. Koronavirusy cheloveka (Nidovirales, Coronaviridae): vozrosshij uroven' epidemicheskoj opasnosti [Human coronaviruses (Nidovirales, Coronaviridae): an increased level of epidemic danger]. *Lechashchij vrach = Attending Physician*, 2013, no. 10, p. 49.

2. Gripp (sezonnyi, ptichii, pandemicheskii) i drugie ORVI [Influenza (seasonal, avian, pandemic) and other SARS]; ed. by V. P. Malogo, M. A. Andreychina. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2013. 320 p.

3. Vremennye metodicheskie rekomendacii "Profilaktika, diagnostika i lechenie novoj koronavirusnoj infekcii (COVID-19). Versiya 7 (03.06.2020)" [Temporary guidelines. Prevention, diagnosis and treatment of a new coronavirus infection (COVID-19). Version 7 (06.03.2020)]. Available at: https://legalacts.ru/doc/vremennye-metodicheskie- rekomendatsii-profilaktika-diagnostika-i-trechenie-novoi-koronavirusnoi_4/. (accessed 14.05.2022)

4. Perevezentsev O. A., Kholodnaya T. O., Burtsev D. V. Zarubezhnyj opyt molekulyarno-geneticheskoj i immunologicheskoj diagnostiki SARS-COV-2 (Obzor) [Foreign experience in molecular genetic and immunological diagnostics of SARS-COV-2 (Review)]. *Laboratornaya sluzhba= Laboratory Service*, 2021, vol. 10, no. 4, pp. 47-54.

5. Shanchev A. A. Rol' KDL v diagnostike i lechenii pacientov s SARS-COV-2 [The role of CDL in the diagnosis and treatment of patients with SARS-COV-2]. *Spravochnik zaveduyushchego KDL = Handbook of the Head of CDL*, 2020, no. 6, pp. 51-56.

6. Grigoryeva T. D., Falileeva M. Yu., Gorokhova A. I. Opredelenie antitel klassa IGG k SARS-COV-2 metodom IFA: mneniya laboranta i eksperta [Determination of IGG antibodies to SARS-COV-2 by ELISA: opinions of a laboratory assistant and an expert]. *Spravochnik zaveduyushchego KDL = Handbook of the Head of the CDL*, 2021, no. 1, pp. 36-40.

7. Borsukov A. V., eds. Mul'timodal'naya differentsial'naya diagnostika virusnoi pnevmonii v usloviyakh pandemii SARS-CoV2 (klinicheskoe nablyudenie) [Multimodal differential diagnostics of viral pneumonia in SARS-CoV2 pandemic conditions (clinical case)]. *Meditsinskii alfavit = Medical Alphabet*, 2021, no. 13, pp. 31–35. https://doi.org/10.33667/2078-5631-2021-13-31-35

8. Takeuchi Y., eds. Diagnostic performance and characteristics of anterior nasal collection for the SARS-CoV-2 antigen test: a prospective study. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, no. 1 (1), p. 10519.

9. Fotis C., eds. Accurate SARS-CoV-2 seroprevalence surveys require robust multi-antigen assays. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11(1), p. 6614.

10. Ricks S., eds. Quantifying the potential value of antigen-detection rapid diagnostic tests for COVID-19: a modelling analysis. *BMC Medicine*, 2021, vol. 19 (1), p. 75.

11. Assis de R. R., eds. Analysis of SARS-CoV-2 antibodies in COVID-19 convalescent blood using a coronavirus antigen microarray. *Nature Communications*, 2021, vol. 12, no. 1, p. 6.

12. Saeed U., eds. Evaluation of SARS-CoV-2 antigen-based rapid diagnostic kits in Pakistan: formulation of COVID-19 national testing strategy. *Virology Journal*, 2021, vol. 18, no. 1, p. 34.

13. Kowada A. Greater public health impact of COVID-19 antigen detection tests. *BMC Medicine*, 2021, vol. 19(1), p. 82.

14. Smorkalov A. Yu., eds. Osobennosti realizacii programmy dopolnitel'noj podgotovki vrachej po special'nosti "Anesteziologiya-reanimatologiya", "Intensivnaya terapiya oslozhnennyh form novoj koronavirusnoj infekcii" [Features of the implementation of the program of additional training for doctors in the specialty "Anesthesiology and Resuscitation", "Intensive Care of Complicated Forms of a New Coronavirus Infection"]. *Virtual'nye tekhnologii v medicine = Virtual Technologies in Medicine*, 2020, no. 2 (24), pp. 42-47.

15. Sinitsyn S. O., eds. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM 2022612845. Polymorphism analysis of russian SARS-COV-2 (PARUS) [Polymorphism analysis of russian SARS-COV-2 (PARUS)]. Certificate RF, no. 2022612845, 2020.

16. Kostarev S. N., Kochetova O. V., Sereda T. G. Programma dlya avtomatizacii analiza serologicheskih markerov antitel immunoglobulinov IGG i IGM COVID-19 [Program for automating the analysis of serological markers of IGG and IGM COVID-19 immunoglobulin antibodies (Express analysis of IGG and IGM COVID-19 antibodies)]. Patent RF, no. 2021667302, 2021.

17. Kostarev S. N., Kochetova O. V., Tatarnikova N. A., Sereda T. G. Razrabotka sistemy avtomaticheskogo diagnoza na nalichie antitel immunoglobulinov IGG i IGM SARS-COV-2 [Development of an automatic diagnosis system for the presence of immunoglobulin IgG and IgM antibodies SARS – CoV-2]. *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, vol. 11(2), pp. 8-24.

18. Tyumentsev A. I., eds. Sistema CRISPR-CAS12 dlya vyyavleniya RNK virusa SARS-COV-2 v ul'tranizkih koncentraciyah [CRISPR-CAS12 system for detection of SARS-COV-2 virus RNA at ultra-low concentrations]. Patent RF, no. 2764023 C1, 2022.

19. Minnullin T. I., eds. Immunological aspects of SARS-COV-2 coronavirus infection [Immunologicheskie aspekty porazheniya koronavirusom SARS-COV-2]. *Vestnik Rossijskoj Voenno-medicinskoj akademii = Bulletin of the Russian Military Medical Academy*, 2021, no. 2 (74), pp. 187-198.

20. Kurosh A. G. Kurs vysshej algebry [Course of higher algebra]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2006. 432 p.

21. Khusanov Kh. I., Shevkoplyas L. A. Sravnitel'nyj analiz SARS-COV-2, SARS-COV I MERS-COV [Comparative analysis of SARS-COV-2, SARS-COV AND MERS-COV]. *Innovacii. Nauka. Obrazovanie = Innovation. The Science. Education*. 2020, vol. 21, pp. 1597-1607.

22. UniProt. Available at: https://www.uniprot.org/proteomes/UP000464024. (accessed 18.05.2022)

23. Akinshina Yu. A., Mardanly S. S., Kiseleva V. A. Immuno-hromatograficheskaya test-sistema dlya differencirovannogo vyyavleniya antitel klassov M i G k koronavirusu SARS-COV-2 [Immunochromatographic test system for the differentiated detection of antibodies of classes M and G to the SARS-COV-2 coronavirus]. *Izvestiya GGTU. Medicina, farmaciya = Proceedings GSTU. Medicine, Pharmacy*, 2020, no. 3, pp. 12-16.

24. Akinshina Yu. A., Mardanly S. S., Kiseleva V. A. Immunohromatograficheskij test dlya differencirovannogo vyyavleniya antitel klassov M i G k koronavirusu SARS-COV-2 [Immunochromatographic test for differential detection of antibodies of classes M and G to SARS-COV-2 coronavirus]. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika = Clinical Laboratory Diagnostics*, 2020, vol. 65, no. 11, pp. 688-692.

Информация об авторах / Information about the Authors

Костарев Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий и автоматизированных систем, Пермский национальный исследовательский политехнический университет; профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова, профессор кафедры зоотехнии, Пермский институт ФСИН России, г. Пермь, Российская Федерация,
e-mail: iums@dom.raid.ru,
ORCID: 0000-0002-3097-7037

Sergey N. Kostarev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Information Technologies and Automated Systems of Perm National Research Polytechnic University; Professor of the Department of Life Safety, Perm State Agrarian-Technological University named after academician D. N. Prianishnikov; Professor of the Department of Animal Science, Perm Institute of the FPS of Russia, Perm, Russian Federation,
e-mail: iums@dom.raid.ru,
ORCID: 0000-0002-3097-7037

Файзрахманов Рустам Абубакирович, доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий и автоматизированных систем, Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Российская Федерация,
e-mail: fayzrakhmanov@gmail.com

Rustam A. Fayzrakhmanov, Dr. of Sci. (Economic), Professor, Head of the Department of Information Technologies and Automated Systems, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation,
e-mail: fayzrakhmanov@gmail.com

Новикова Оксана Валерьевна, доктор ветеринарных наук, профессор кафедры зоотехнии, Пермский институт ФСИН России; профессор кафедры внутренних незаразных болезней,
хирургии и акушерства, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова,
г. Пермь, Российская Федерация,
e-mail: kochetovaox@yandex.ru,
ORCID: 0000-0001-6997-9067

Oksana V. Novikova, Dr. of Sci. (Veterinary), Professor of the Department of Animal Science, Perm Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia; Professor of the Department of Internal Non-Infectious Diseases, Surgery and Obstetrics, Perm State Agrarian Technological University named after academician D. N. Pryanishnikov, Perm, Russian Federation,
e-mail: kochetovaox@yandex.ru,
ORCID: 0000-0001-6997-9067

Комягина Оксана Владимировна, руководитель отдела продаж, врач-терапевт, Медицинское учреждение «Философия
красоты и здоровья», г. Пермь,
Российская Федерация,
e-mail: komyagina@medic-group.ru

Oksana V. Komyagina, Head of Sales Department, Therapist, Medical Institution "Philosophy of Beauty and Health", Perm, Russian Federation,
e-mail: komyagina@medic-group.ru

Середа Татьяна Геннадьевна, доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова,
г. Пермь, Российская Федерация,
e-mail: iums@dom.raid.ru

Tatayna G. Sereda, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Life Safety, Perm State Agrarian-Technological University named after academician D. N. Prianishnikov, Perm, Russian Federation,
e-mail: iums@dom.raid.ru

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-28-45

CC BY 4.0

Разработка биотехнической системы для оценки и коррекции психофизиологического состояния человека

А. А. Петренко[1] ✉, В. С. Кубланов[1]

[1] Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
ул. Мира 19, г. Екатеринбург 620002, Российская Федерация

✉ e-mail: a.a.petrenko@urfu.ru

Резюме

Целью исследования *является разработка биотехнической системы (БТС) с использованием нейроэлектростимуляции периферических нервных образований шеи для оценки и коррекции психофизиологического состояния (ПФС) человека.*

Методы. *В исследовании приняли участие 79 добровольцев-испытуемых, разделенных с помощью рандомизации на основную, контрольную и плацебо группы. Оценка психометрических параметров рабочей памяти проводилась с использованием теста dual 2-back, а оценка физиологического состояния проводилась с помощью анализа вариабельности сердечного ритма (ВСР). Коррекция ПФС проводилась с помощью стимуляции нервных образований шеи пространственно распределенным полем импульсов напряжения, мишенью стимуляции являлись шейные ганглии симпатической нервной системы.*

Результаты. *Результаты исследования показали, что предложенная структура БТС и методика коррекции ПФС человека позволяют улучшать показатели рабочей памяти и нормализовать состояние вегетативной нервной системы после пяти процедур коррекции. Полученные результаты по тесту практически не изменяются и сохраняются спустя 2 месяца.*

Заключение. *БТС, включающая в себя блок многоканальной нейроэлектростимуляции периферических нервных образований шеи, является эффективной для коррекции ПФС человека, что актуально для решения задач поиска новых способов и методов улучшения познавательной активности человека в сфере образования.*

Ключевые слова: *биотехническая система; нейроэлектростимуляция; психофизиологическое состояние; вариабельность сердечного ритма; когнитивные характеристики; рабочая память.*

Финансирование: *Исследование выполнено в рамках Программы повышения конкурентоспособности Уральского федерального университета, в соответствии с Указом Президента РФ от 07 мая 2012 г. № 599 и Указом Президента РФ от 16 марта 2013 г. № 21.*

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

Для цитирования: Петренко А. А., Кубланов В. С. Разработка биотехнической системы для оценки и коррекции психофизиологического состояния человека // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 3. С. 28–45. https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-28-45.

Поступила в редакцию 06.06.2022 *Подписана в печать 15.07.2022* *Опубликована 30.09.2022*

© Петренко А. А., Кубланов В. С., 2022

Development of a Biotechnical System for Assessment and Correction the Human Psychophysiological State

Anna A. Petrenko[1] ✉, Vladimir S. Kublanov[1]

[1] Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin
19 Mira Str., Ekaterinburg 620002, Russian Federation

✉ e-mail: a.a.petrenko@urfu.ru

Abstract

The purpose of research *is to develop a biotechnical system (BTS) using neuroelectrostimulation of the peripheral nerve formations of the neck to assess and correct the psychophysiological l state of a person.*

Methods. *The study involved 79 volunteers-subjects, divided by randomization into the main, control and placebo groups. The assessment of psychometric parameters of working memory was carried out using the dual 2-back test, and the assessment of the functional state was carried out using the analysis of heart rate variability (HRV). Correction of the psychophysiological state was carried out by stimulating the nerve formations of the neck with a spatially distributed field of voltage impulses; the target of stimulation was the cervical ganglia of the sympathetic nervous system.*

Results. *The results of the study showed that the proposed structure of the BTS and the method for correcting the human psychophysiological state can improve working memory performance and normalize the state of the autonomic nervous system after five correction procedures. The results obtained on the test practically do not change and remain after 2 months.*

Conclusion. *BTS, which includes a block of multichannel neuroelectrostimulation of peripheral nerve formations of the neck, is effective for correcting human psychophysiological l state, which is important for solving the problems of finding new ways and methods to improve human cognitive activity in the field of education.*

Keywords: *biotechnical system; neuroelectrostimulation; psychophysiological state; heart rate variability; methods and algorithms; cognitive characteristics; working memory.*

Funding: *The study was carried out within the framework of the Program for Improving the Competitiveness of the Ural Federal University, in accordance with the Decree of the President of the Russian Federation of 07.05.2012 No. 599 and Decree of the President of the Russian Federation of 16.03.2013 No. 211.*

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

For citation: Petrenko A. A., Kublanov V. S. Development of a Biotechnical System for Assessment and Correction the Human Psychophysiological State. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022; 12(3): 28–45. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-28-45.

Received 06.06.2022 *Accepted 15.07.2022* *Published 30.09.2022*

***

Введение

На сегодняшний день наблюдается активное развитие информационных технологий, затрагивающих практически сферы жизни общества. Уровень развития цифровых технологий неразрывно связан с уровнем развития экономики страны и оказывает влияние на общий уровень жизни населения. В то же время постоянное развитие технологии

и неослабляемый поток информации требует огромных ресурсов человека, которые необходимы для обработки и освоения полученной информации [1].

В процессе обработки большого потока информации нервная система испытывает значительные перегрузки. Этому способствуют высокие объемы информации, ее избыточность, отсутствие систем фильтрации в соответствии с потребностями [2]. Цифровизация коммуникативной сферы человека (информационные ресурсы, социальные сети, медиасервисы, мобильные средства общения) приводит к формированию гиперинформационной среды [3]. В таких условиях включаются механизмы адаптации нервной системы (противодействующие стрессу), которые ограничивают способности человека к обработке всей поступающей информации. В результате важная информация может оказаться незафиксированной и неосмысленной. Более того, длительное пребывание в гиперинформационном поле может стать причиной апатии (потери интересов), бессонницы, головной боли, синдрома хронической усталости и психосоматических расстройств. Обращение за медицинской помощью не избавляет от причин подобных симптомов, потому лечение нередко оказывается малоэффективным [4].

Также в последнее время из-за развития информационных технологий наблюдается снижение физической активности населения [5]. Снижение двигательной активности негативно сказывается на системе кровообращения, опорно-двигательном аппарате, обмене веществ. Малоподвижный образ жизни может стать провоцирующим фактором психофизиологических изменений и привести к снижению скорости реакций и повышению риска совершения ошибок с непредсказуемыми последствиями, особенно при выполнении монотонной нагрузки [6].

Вопрос профилактики развития «информационного стресса» и коррекции психофизиологического состояния (ПФС) не менее важен в образовательной деятельности как для студентов, так и для преподавателей [7]. Увеличение умственных и психических нагрузок приводит к снижению когнитивных способностей и может выражаться в виде неэффективной обработки информации, в снижении уровня контроля и адаптационных ресурсов. Это приводит к развитию стресса и психосоматических заболеваний: невротических расстройств, заболеваний сердечно-сосудистой системы, язвенной болезни желудка и двенадцатиперстной кишки, нарушению мозгового кровообращения [8].

Согласно одному из ключевых принципов нейробиологии, наш мозг является пластичным и постоянно меняется в результате обучения. В процессе обучения формируется когнитивный резерв человека и адаптационные реакции на стресс, травматические события и болезни. Таким образом, проблемы, возникающие при обучении, могут отражать

неэффективное использование ресурсов, которыми обладает головной мозг [9]. Возникает идея активации этих ресурсов с целью повышения скорости и эффективности познавательной деятельности.

В решении этой проблемы применяются различные подходы, среди которых в последнее время востребованными являются немедикаментозные неинвазивные технологии с использованием нейроэлектростимуляции [10].

На сегодняшний день разработка неинвазивных биотехнических систем (БТС) для организации психофизиологической адаптации человека, реализующих комплексный подход в оценке, анализе и коррекции ПФС человека несомненно, является актуальной задачей [11].

Структура биотехнической системы

Разработанная БТС представляет собой совокупность биологических и технических элементов, связанных между собой в едином контуре управления [12]. Основополагающим принципом функционирования биотехнических систем (БТС) является согласованность между техническими и биологическими элементами системы [13].

При разработке такой системы применялись не только технические средства, но и психометрические методики, а также методы функциональных исследований состояния человека [14].

Исходя из этого структурная схема БТС для оценки и коррекции ПФС человека может быть представлена ниже (рис. 1).

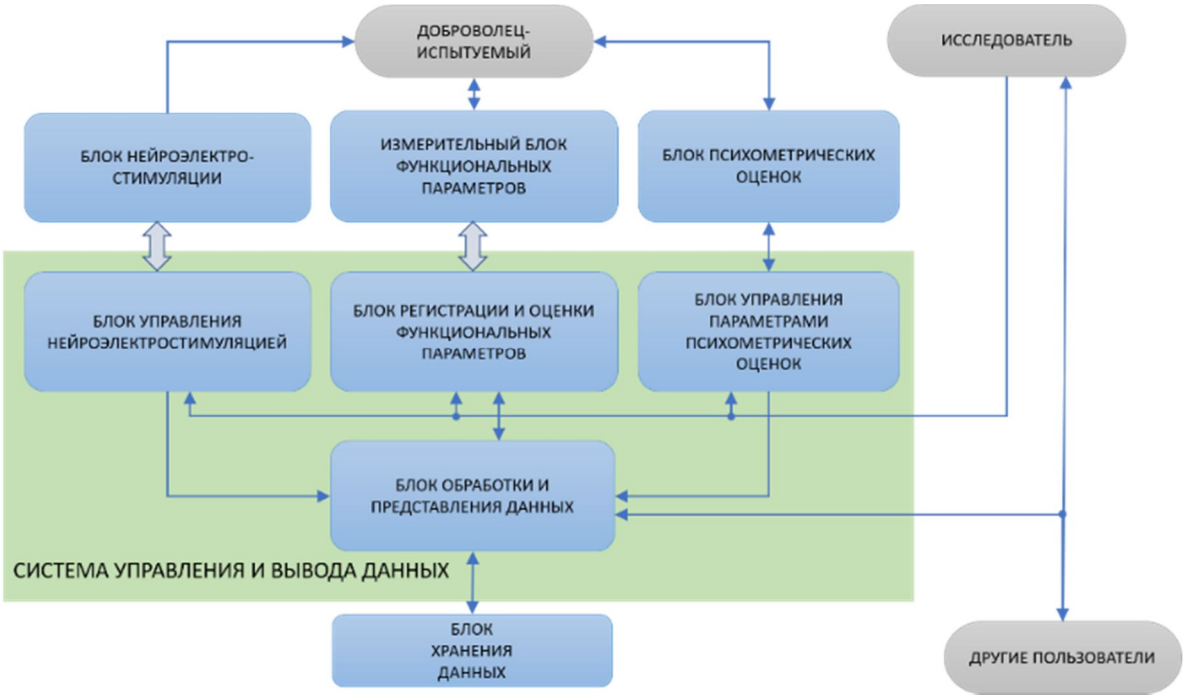


Рис. 1. Структура БТС

Fig. 1. BTS structure

К техническим элементам БТС относятся: блок нейроэлектростимуляции, измерительный блок функциональных параметров, блок психометрических оценок, система управления и вывода данных, блок хранения данных.

Биологическими элементами являются доброволец-испытуемый, исследователь (врач) и пользователи специализированной локальной базой данных хранения информации и управления процессом оценки и коррекции ПФС. Все элементы системы функционируют совместно для достижения общей цели – оценка и коррекция ПФС добровольца-испытуемого.

Блок нейроэлектростимуляции

Блок нейроэлектростимуляции может иметь две реализации структуры импульсных последовательностей напряжения, обеспечивающих электростимуляцию нервных образований шеи: многоканальное пространственно распределенное поле импульсов, мишенью которого являются шейные ганглии симпатической нервной системы; последовательность импульсов между двумя электродами – в этом случае мишенью стимуляции является одна из областей шеи, в которой присутствие волокон симпатической нервной системы минимально.

Для формирования разных структур импульсных последовательностей в БТС применялся первый модуль аппарата «НЕЙРОПОЛИКОР» – современная модификация аппарата «СИМПАТОКОР-01» [15]. Рассмотрими общий вид первого модуля аппарата «НЕЙРОПОЛИКОР» (рис. 2).

Рис. 2. Общий вид первого модуля аппарата «НЕЙРОПОЛИКОР»

Fig. 2. The general view of the first module "NEUROPOLYCOR" device

Формирование пространственно распределенного поля импульсов напряжения происходит между 13 электродами одного из многоэлементных электродов (катодов) и одним или несколькими электродами другого (анодов). Один цикл переключения катодов включает «пачку» таких импульсов. При этом под каждым катодом протекает ток в течение одного парциального импульса, а в области анода – в течение всей «пачки» импульсов. Таким образом, в тканях шеи под анодом за один период формирования «пачки» импульсов формируется пространственно сосредоточенная токовая структура, длительность которой зависит от суммы длительностей 13 парциальных импульсов напряжения, а в зоне катодов – пространственно распределенная токовая структура из 13 зон, каждая из которых соответствует место-

положению парциального катода, а длительность парциального импульса тока зависит от длительности парциального импульса.

Основной диапазон параметров, задаваемых аппаратом для нейроэлектростимуляции: амплитуда импульсов тока до 15 мА, длительность от 15 до 60 мкс и частота «пачки» импульсов – от 5 до 150 Гц.

Управление структурой импульсных последовательностей, параметрами нейроэлектростимуляции и лечебным процессом осуществляется через блок управления нейроэлектростимуляцией по BlueTooth-каналу, формируемому приемопередающими элементами, расположенными в аппарате «НЕЙРОПОЛИКОР» и персональном компьютере.

Измерительный блок функциональных параметров обеспечивает регистрацию биомедицинских сигналов, отражающих физиологические процессы организма. В [16] показано, что наибольшую диагностическую ценность при нейроэлектростимуляции нервных образований шеи имеет анализ ВСР. При этом было отмечено значительное улучшение функциональных связей медиальной префронтальной коры с остальными областями мозга, что свидетельствует об улучшении коннективности отделов мозга, особенно за счет активации работы фронтальной коры. Для реализации функций измерительного блока функциональных параметров в БТС используется автономный блок АБП-10 портативного электроэнцефалографа – анализатора «Энцефалан-ЭЭГР-19/26», который позволяет регистрировать сигнал электрокардиаграммы (ЭКГ) и анализировать ВСР. Измерительный блок функциональных параметров и блок регистрации и оценки функциональных параметров соединены и синхронизированы между собой в единую беспроводную сеть с помощью технологии BlueTooth.

Блок психометрических оценок представлен в виде теста N-back для оценки рабочей памяти. Методика N-back является современным и высокоэффективным способом тренировки памяти [17; 18; 19].

В исследовании был выбран уровень сложности dual 2-back: доброволец-испытуемый работает с последовательностью визуальных и аудиальных стимулов, представляемых по одному в каждый интервал времени. Добровольцу-испытуемому необходимо дать ответ в случае, если текущий стимул совпадает с элементом, представленным 2 интервала назад.

По результатам теста определялась общая оценка правильности выполнения теста. Тест реализован в виде программного приложения Brain Workshop на персональном компьютере.

Система управления и вывода данных представлена в виде персонального компьютера с набором программных комплексов и включает в себя 4 элемента: блок управления нейроэлектростимуляцией; блок регистрации и

оценки функциональных параметров; блок управления параметрами психометрический оценок; блок обработки и представления данных. Управление параметрами нейроэлектростимуляции реализовано с помощью программного приложения для персонального компьютера.

Пример графического интерфейса задания параметров рассмотрен ниже (рис. 3). Приложение для пульта управления позволяет выбирать структуру импульсной последовательности, направление поля и мишень стимуляции, изменять амплитуду, длительность и частоту формирующихся «пачек» импульсов [20].

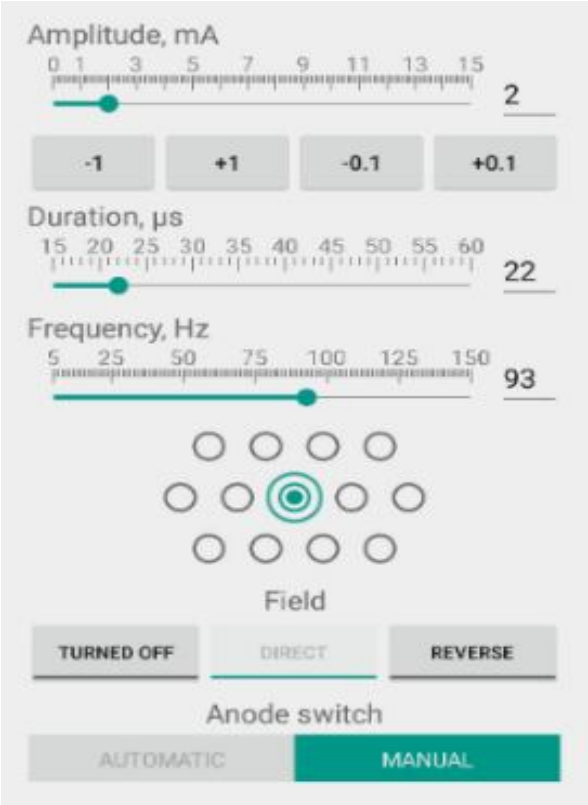


Рис. 3. Графический интерфейс задания параметров нейроэлектростимуляции

Fig. 3. Graphical interface for setting of neurostimulation parameters

Управление параметрами регистрации функциональных параметров реализовано с помощью программного приложения комплекса «Энцефалан-ЭЭГР-19/26», а блоком психометрических оценок реализовано через программное приложение Brain Workshop.

Блок обработки и представления данных представлен в виде программных средств, необходимых для анализа, обработки и представления полученных данных, реализованных на языке программирования PYTHON, а для статистического анализа применялся пакет прикладных программ *STATISTICA 12.0*.

Полученные при проведении исследования данные отправляются в блок хранения данных.

Блок хранения данных представляет собой облачное хранилище базы данных, которое обеспечивает сохранность необходимых для работы БТС наборов данных, отображение данных в необходимом представлении, возможность быстрого поиска по заданным параметрам.

Разработанная база данных включает в себя набор текстовых, числовых и визуальных данных, которые позволяют хранить основную информацию, получаемых в исследованиях: протоколы исследования, Ф. И. О. добровольца-испытуемого, результаты его тестирования, данные функциональных параметров, а также результаты статистической обработки данных.

Основными элементами базы данных являются таблицы (сущности):

1. «Картотека исследователей» имеет колонки ID исследователя, Ф. И. О. исследователя, должность, телефон.

2. «Картотека испытуемых» имеет колонки ID испытуемого Ф. И. О., пол, дату начала исследований, возраст на момент исследования, пол, Ф. И. О. исследователя, группу, информированное согласие.

3. «Исходные данные» имеет колонки Ф. И. О. испытуемого, группу, дату исследования, этап исследования, ЭКГ, ВСР, N-back first trial, N-back second trial, протокол исследований, статистическую обработку данных.

4. «N-back» имеет колонки Ф. И. О. испытуемого, группа, этап исследования и параметры теста N-back.

5. «ВСР» имеет колонки Ф. И. О. испытуемого, группу, этап исследования, стадию и параметры, извлекаемые из данных ВСР.

6. «Статистическая обработка данных» представляет собой таблицу, содержащую гиперссылки на электронные таблицы с исходными данными в системе *STATISTICA*, сохраненными в формате *.sta; совокупность численной, текстовой и графической информации, полученной при статистическом анализе в рабочей книге в формате*.stw; а также проекты для обработки данных, написанные в Python 2.7 в формате *. ipynb.

Данные «Ф. И. О. испытуемого» подгружаются из исходной таблицы «Картотека испытуемых», «Ф. И. О. исследователя» подгружаются из исходной таблицы «Картотека исследователя», что позволяет исключить повторное заполнение данных и их дублирование.

Для атрибутов «пол», «группа», «этап исследования», «стадии исследования» создан мастер подстановки для заполнения форм готовыми вариантами. В этом случае сокращается время внесения данных в базу, что облегчает работу пользователю системы.

База данных доступна для исследователя на любом этапе исследования.

Материалы и методы

Исследования проведены в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б. Н. Ельцина.

В исследованиях приняли участие 79 добровольцев-испытуемых в возрасте от 20 до 25 лет, подписавшие информированное согласие добровольного участия в исследованиях.

Исследования состояли из 2 этапов:

– *1 этап* – первичная оценка базовых значений параметров теста dual 2-back и формирование групп добровольцев-испытуемых для исследований возможностей коррекции ПФС с помощью разработанной БТС (1 день исследования). Формирование групп проводилось с помощью рандомизации участников исследований для включения их в одну из трех групп: основную, плацебо и контрольную. В результате в основную

группу были включены 33 добровольца-испытуемых, в контрольную – 25, плацебо – 21;

– *2 этап* – проведение коррекционной методики с применением разработанной БТС.

При коррекции рабочей памяти для добровольцев-испытуемых основной группы применялась *нейроэлектростимуляция пространственно распределенным полем импульсов напряжения* (5 процедур, 2-6 дней исследования).

Добровольцам-испытуемым группы плацебо проводилась *плацебо стимуляция*, в которой используется *импульсная последовательность напряжения, формируемая между одним анодом и одним катодом* (5 процедур, 2-6 дней исследования).

Для добровольцев-испытуемых контрольной группы *стимуляция не применялась*.

С помощью измерительного блока функциональных параметров БТС регистрировался сигнал ЭКГ с целью дальнейшего анализа параметров ВСР.

В таблице 1 представлено описание исследуемых групп.

Рассмотрим циклограмму проведения одной процедуры 2 этапа исследования (табл. 2).

Таблица 1. Описание исследуемых групп

Table 1. Description of the study groups

Группа	Количество испытуемых	Воздействие
Основная	33	Нейроэлектростимуляция
Плацебо	25	Плацебо стимуляция
Контрольная	21	Стимуляция отсутствует

Таблица 2. Циклограмма исследования

Table 2. Sequence diagram of the study

Этап	Группы			Время, мин
	Основная	Плацебо	Контрольная	
1	Фон			5
2	Нейроэлектростимуляция + dual 2 back	Плацебо стимуляция + dual 2 back	dual 2 back	5
3	Перерыв			5
4	Нейроэлектростимуляция + dual 2 back	Плацебо стимуляция + dual 2 back	dual 2 back	5
5	Последействие			5

Результаты и их обсуждение

Первым этапом обработки данных был этап анализа психометрических данных с целью определения влияния нейроэлектростимуляции на улучшение параметров теста dual 2-back в трех группах: основной, контрольной и плацебо.

Вторым этапом обработки данных был проведен анализ функциональных параметров ВСР в основной и плацебо группах для оценки влияния типа нейроэлектростимуляции на изменение физиологического состояния испытуемого.

Для оценки изменений параметров рабочей памяти в ходе применения разработанной БТС был проведен дисперсионный анализ показателей теста dual 2-back. Результаты представлены ниже (рис. 4).

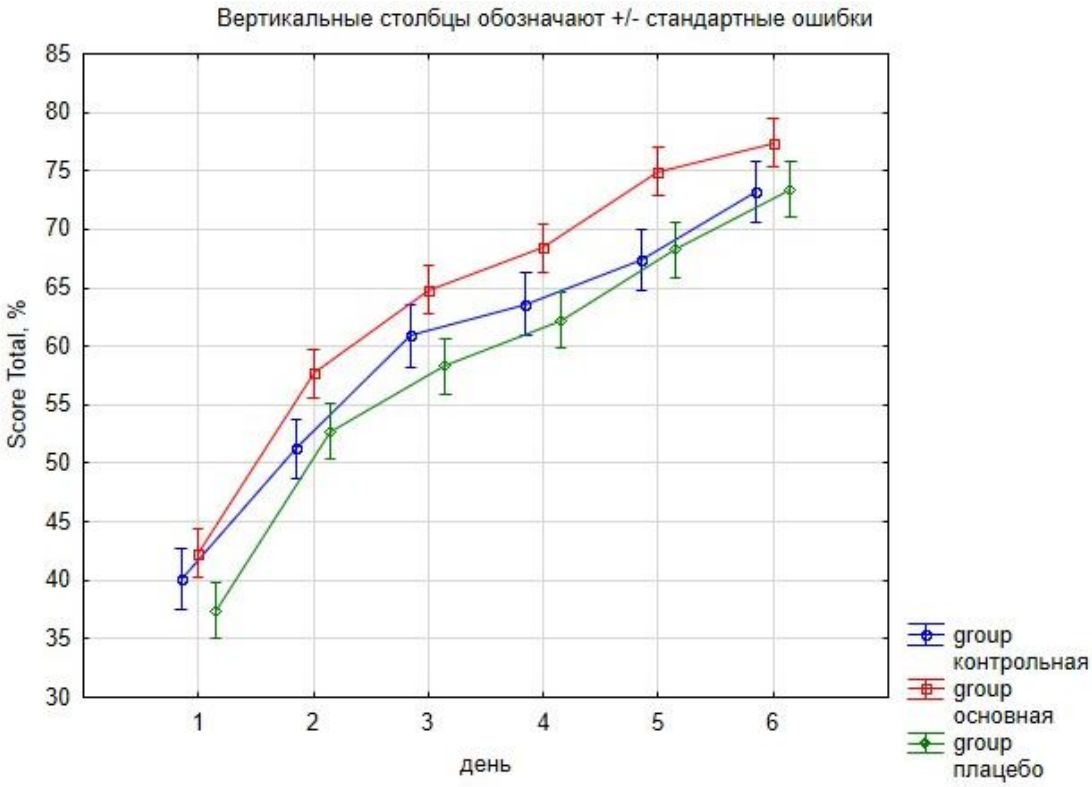


Рис. 4. Общая оценка правильности выполнения теста

Fig. 4. Total score

По первичной оценке параметров dual 2-back теста средний показатель общей оценки правильности выполнения теста по трем группам составил (40±2,4) %.

После первой процедуры наблюдается наибольший прирост показателя общей оценки правильности выполнения теста во всех трех группах: средний показатель общей оценки правильности выполнения теста в основной группе составил (57,7±2,1) %, в контрольной группе – (51,2±2,6) %, в группе плацебо – (52,7±2,4) %.

Значимая разница между тремя группами наблюдается после третьей

процедуры. Средний показатель общей оценки правильности выполнения теста в основной группе после третьей процедуры на 4 день исследования составил (68,4±2,1) %, в контрольной группе – (63,3±2,6) %, в группе плацебо – (62,3±2,4) %.

В основной и плацебо группах для оценки физиологических изменений при реализации коррекционной методики нейроэлектростимуляции проведен анализ спектральных составляющих параметров ВСР «до» и «после» коррекции, полученных с помощью Фурье-преобразования. Внутри каждой группы посчитаны средние значения параметров ВСР и соответствующие им средние квадратичные отклонения за 5 минут регистрации сигнала ЭКГ. Для внутригрупповых различий применялся параметрический критерий Стьюдента для зависимых выборок и непараметрический критерий Уилкоксона. В ходе обработки данных были получены значимые изменения в основной группе по параметрам при $p < 0,05$: значения суммарной мощности спектра TP_f, низкочастотной (Low Frequency – LF_f), очень низкочастотной (Very Low Frequency – VLF_f) спектральных компонент. Результаты анализа данных ВСР представлены ниже (рис. 5-7).

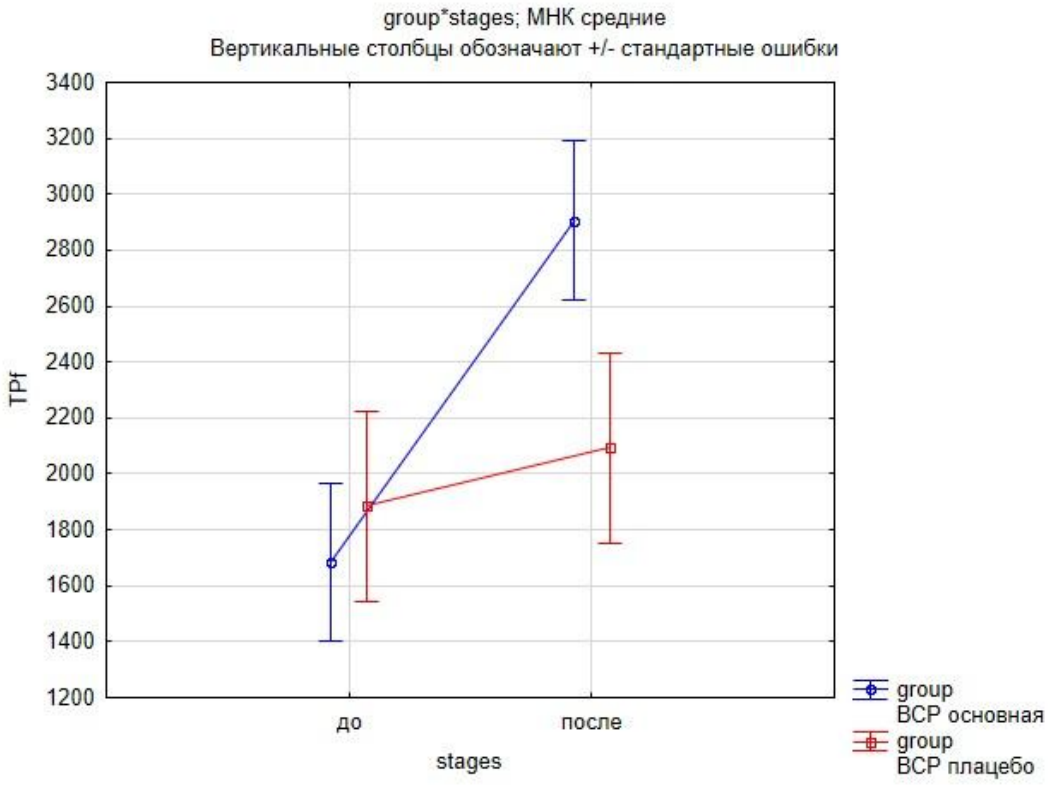


Рис. 5. Динамика изменения параметра TP_f в основной и плацебо группах «до» и «после», мс^2

Fig. 5. Dynamics of change in the TP_f parameter in the main and placebo groups "before" and "after", ms^2

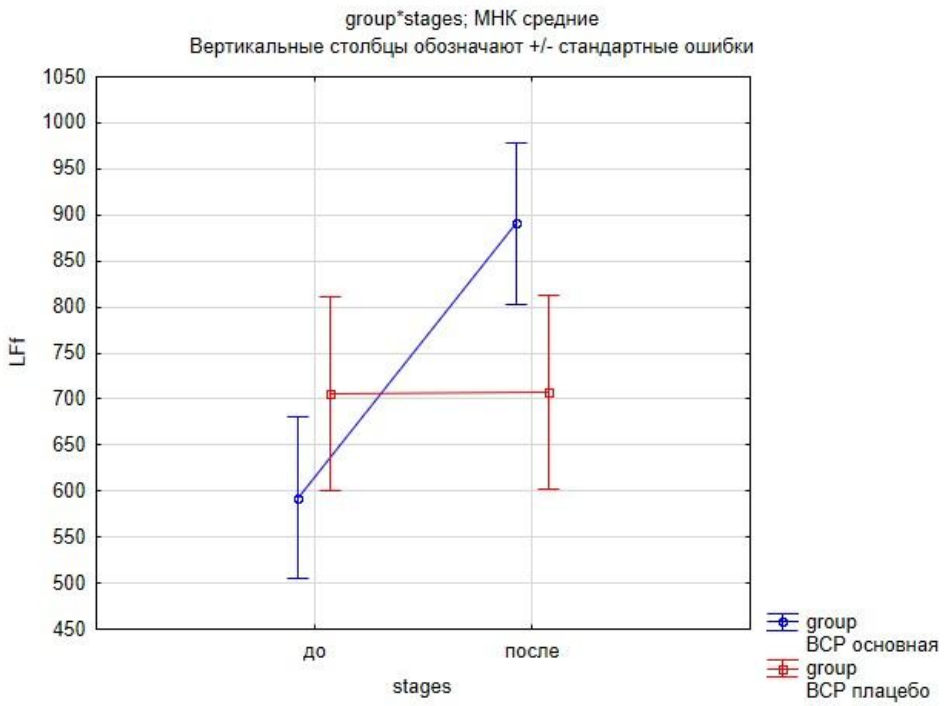


Рис. 6. Динамика изменения параметра мощности LF_f в основной и плацебо группах «до» и «после», мс^2

Fig. 6. Dynamics of change in the LF_f parameter in the main and placebo groups "before" and "after", ms^2

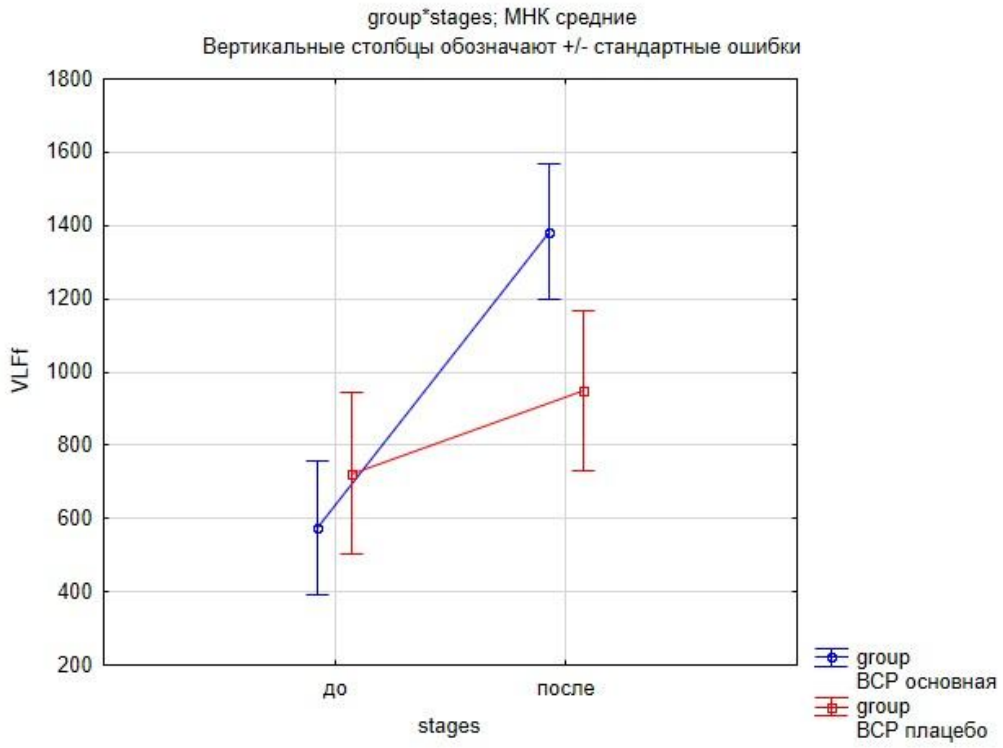


Рис. 7. Динамика изменения параметра мощности VLF_f, мс^2

Fig. 7. Dynamics of change in the VLF_f parameter in the main and placebo groups "before" and "after", ms^2

На рисунках 5-7 наблюдается значимый рост параметра TP_f, LF_f, VLF_f в основной группе, что отражает увеличение энергетических ресурсов автономной и центральной нервной системы. Значимый рост параметров VLF в основной группе свидетельствует об активации механизмов адаптации для стабилизации внешнего стрессового воздействия, вызванного нагрузочными пробами. В плацебо группах значимых изменений в данных параметрах не наблюдается.

При повторной оценке параметров теста спустя 2 месяца в основной группе наблюдается сохранение полученных результатов: после пятой процедуры значения общей оценки правильности выполнения теста составили (78,4±1,8)%, спустя 2 месяца – (75,4±1,9)% (рис. 8).

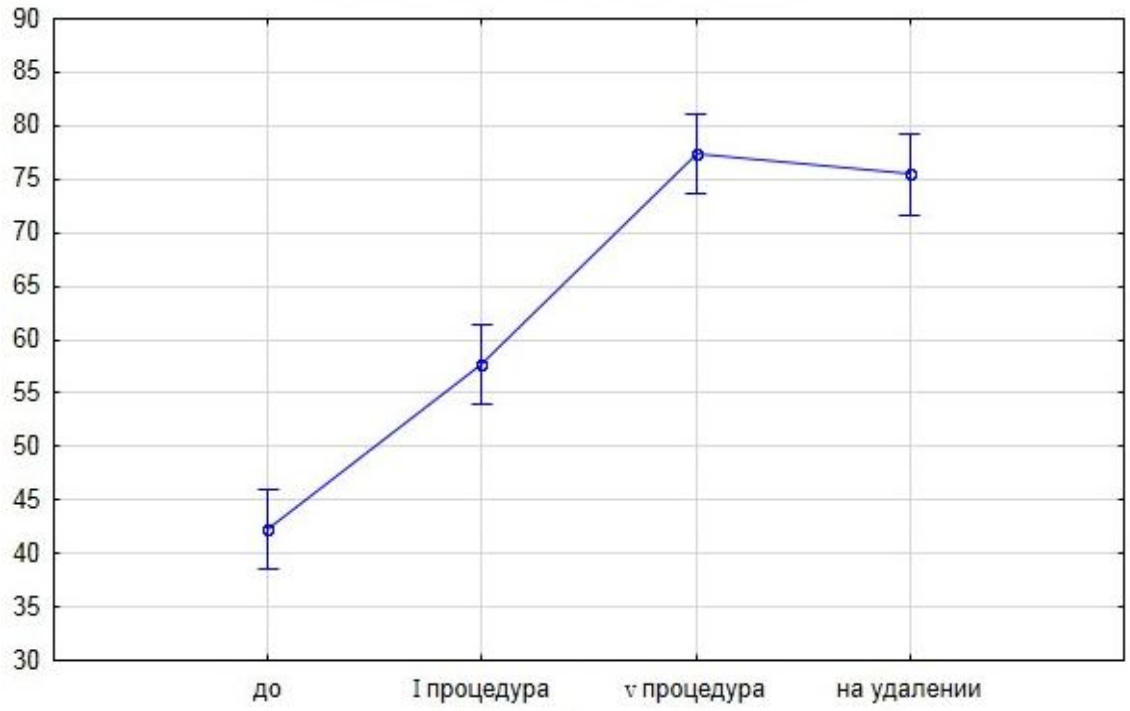


Рис. 8. Общая оценка правильности выполнения теста спустя 2 месяца в основной группе, %

Fig. 8. Total score in main group after 2 months in the main group, %

Выводы

В работе рассмотрены возможности применения БТС для оценки и коррекции ПФС с помощью нейроэлектростимуляции периферических нервных образований шеи.

Показано, что:

– предложенная структура БТС соответствует основным принципам согласованности технических и биологических элементов БТС;

– применение для стимуляции пространственно распределенного поля импульсов напряжения, формируемого в аппарате «НЕЙРОПОЛИКОР», обеспечивает коррекцию психометрических параметров рабочей памяти у добро-

вольцев-испытуемых, у которых начальный уровень правильности выполнения теста dual 2- back был ниже 45 %;

– в основной группе после трех процедур нейроэлектростимуляции наблюдаются значимые межгрупповые различия в параметрах теста dual 2-back: средний показатель общей оценки правильности выполнения теста в основной группе составил (57,7±2,1) %, в контрольной группе – (51,2±2,6) %, в группе плацебо – (52,7±2,4) %;

– результаты теста dual 2-back сохраняются на временном удалении: в основной группе значения общей оценки правильности выполнения теста через 2 месяца изменились незначительно – с (78,4±1,8) % до (75,4±1,9) %;

– установлено, что после нейроэлектростимуляции наблюдается повышение активности парасимпатической нервной системы организма и нормализация вегетативного баланса.

Полученные результаты исследования могут быть применены в образовательном процессе при разработке новых программ и методик, направленных на повышение качества обучения и скорости освоения новых навыков, а также в качестве метода профилактики «информационного стресса».

Список литературы

1. Karduck A. TeamBuilder: a hyper-information environment for augmenting global collaborative work // 5th IEEE COMSOC International Workshop on Multimedia Communications, 1994. P. 941-946.

2. Cogswell K. A. Effects of stress and information overload on meaning formation. Graduate Student Theses, Dissertations & Professional Papers. 4902. University of Montana, 1985. 63 p.

3. Röttger P., Vedres B. The Information Environment and its Effects on Individuals and Groups. England: University of Oxford, 2020. 60 p.

4. Misra S., Roberts P., Rhodes M. Information overload, stress, and emergency managerial thinking // Int. J. Disaster Risk Reduct. 2020. Vol. 51. P. 101762.

5. Insufficient Level of Physical Activity and Its Effect on Health Costs in Low- and Middle-Income Countries / W. Liu [et al.] // Front. Public Health. 2022. Vol. 10. P. 937196.

6. Николаев А. А. Двигательная активность и здоровье современного человека / Смоленский государственный институт физической культуры, Смоленский государственный университет. Смоленск, 2005. 93 с.

7. Azmi F. M., Khan H. N., Azmi A. M. The impact of virtual learning on students' educational behavior and pervasiveness of depression among university students due to the COVID-19 pandemic // Glob. Health. 2022. Vol. 18, N 1. P. 70.

8. Салехов С. А. Психологический стресс как фактор развития психосоматических заболеваний // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. 2016. № 1 (92). С. 94–98.

9. Blakemore C. Brain Waves Module 2: Neuroscience : Implications for Education and Lifelong Learning. London: Royal Society, 2011. 36 p.

10. Petrenko A., Kublanov V. The Application of Multichannel Neuro-electrostimulation for Working Memory and Attention Improvement of Young Subjects // Proceedings of the 14th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies. Vienna, Austria: SCITEPRESS – Science and Technology Publications, 2021. P. 255–260.

11. Петренко А. А., Кубланов В. С. Применение метода нейроэлектростимуляции для повышения параметров памяти и внимания // Агроука-2020: труды Международной научно-практической конференции / Государственная публичная научно-техническая библиотека СО РАН. Новосибирск, 2020. С. 432–437.

12. Акулов С. А., Федотов А. А. Основы теории биотехнических систем. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 259 р.

13. Ершов Ю. А., Щукин С. И. Основы анализа биотехнических систем. Теоретические основы БТС. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 526 с.

14. Попечителев Е. П. Человек в биотехнической системе. Старый Оскол: ТНТ, 2016. 584 с.

15. Kublanov V. S., Babich M. V., Petrenko T. S. New Principles for the Organization of Neurorehabilitation // Biomed. Eng. 2018. Vol. 52, N 1. P. 9–13.

16. Investigation of the Neuro-electrostimulation Mechanisms by Means of the Functional MRI: Case Study / V. Kublanov [et al.] // Proceedings of the 11th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies. Funchal, Madeira, Portugal: SCITEPRESS – Science and Technology Publications, 2018. P. 319–324.

17. Improving working memory: the effect of combining cognitive activity and anodal transcranial direct current stimulation to the left dorsolateral prefrontal cortex / S. C. Andrews [et al.] // Brain Stimulat. 2011. Vol. 4, N 2. P. 84–89.

18. Fazeli S. H. The Relationship between the Extraversion Trait and Use of the English Language Learning Strategies // Indian J. Sci. Technol. 2012. Vol. 5, N 4. P. 2651-2657.

19. Normative data on the n-back task for children and young adolescents / S. Pelegrina [et al.] // Front. Psychol. 2015. Vol. 6. P. 1544.

20. Кубланов В. С., Бабич М. В., Петренко Т. С. Новые принципы организации нейрореабилитации // Медицинская техника. 2018. № 1(307). С. 6–9.

References

1. Karduck A. TeamBuilder: a hyper-information environment for augmenting global collaborative work. 5th IEEE COMSOC International Workshop on Multimedia Communications, 1994, pp. 941-946.

2. Cogswell K. A. Effects of stress and information overload on meaning formation. Graduate Student Theses, Dissertations & Professional Papers. 4902. University of Montana, 1985. 63 p.

3. Röttger P., Vedres B. The Information Environment and its Effects on Individuals and Groups. England, University of Oxford, 2020. 60 p.

4. Misra S., Roberts P., Rhodes M. Information overload, stress, and emergency managerial thinking. *Int. J. Disaster Risk Reduct*, 2020, vol. 51, p. 101762.

5. Liu W., eds. Insufficient Level of Physical Activity and Its Effect on Health Costs in Low- and Mid-dle-Income Countries. *Front. Public Health*, 2022, vol. 10, p. 937196.

6. Nikolaev A. A. Dvigatel'naya aktivnost' i zdorov'e sovremennogo cheloveka [Motor activity and health of modern man]. Smolensk, Smolensk State Institute of Physical Culture Publ., Smolensk State University Publ., 2005. 93 p.

7. Azmi F. M., Khan H. N., Azmi A. M. The impact of virtual learning on students' educational behavior and pervasiveness of depression among university students due to the COVID-19 pandemic. *Glob. Health*, 2022, vol. 18, no. 1, p. 70.

8. Salehov S. A. Psikhologicheskii stress kak faktor razvitiya psikhosomatiche-skikh zabolevanii [Psychological stress as a factor in the development of psychosomatic diseases]. *Vestnik Novgorodskogo Gosudarstvennogo Universiteta imeni Jaroslava Mudrogo = Bulletin of the Novgorod State University named after Yaroslav Mudry*, 2016, no. 1 (92), pp. 94–98.

9. Blakemore C. Brain Waves Module 2: Neuroscience : Implications for Education and Lifelong Learn-ing. London, Royal Society, 2011. 36 p.

10. Petrenko A., Kublanov V. The Application of Multichannel Neuro-electrostimulation for Working Memory and Attention Improvement of Young Subjects. Proceedings of the 14th International Joint Con-ference on Biomedical Engineering Systems and Technologies. Vienna, Austria, SCITEPRESS – Science and Technology Publications, 2021, pp. 255–260.

11. Petrenko A. A., Kublanov V. S. [Application of the method of neuroelectrostimulation to increase the parameters of memory and attention]. *Agrouka-2020. Trudy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* [Agricultural science-2020. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Novosibirsk, Gosudarstvennaya publichnaya nauchno-tekhnicheskaya biblioteka SO RAN Publ., 2020, vol. 2, pp. 432–437. (In Russ.)

12. Akulov S. A., Fedotov A. A. Osnovy teorii biotekhnicheskikh sistem [Fundamentals of the theory of biotechnical systems]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2014. 259 p.

13. Ershov Ju. A., Shhukin S. I. Osnovy analiza biotekhnicheskikh sistem. Teoreticheskie osnovy BTS [Fundamentals of the analysis of biotechnical systems. Theoretical foundations of BTS]. Moscow, MGTU im. N. Je. Baumana Publ., 2011. 526 p.

14. Popechitelev E. P. Chelovek v biotekhnicheskoi sisteme [Man in the biotechnical system. Tutorial]. Staryj Oskol, TNT Publ., 2016. 584 p.

15. Kublanov V. S., Babich M. V., Petrenko T. S. New Principles for the Organization of Neurorehabilitation. *Biomed. Eng.*, 2018, vol. 52, no. 1, pp. 9–13.

16. Kublanov V., eds. Investigation of the Neuro-electrostimulation Mechanisms by Means of the Func-tional MRI: Case Study. Proceedings of the 11th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies. Funchal, Madeira, Portugal, SCITEPRESS – Science and Technology Publications, 2018, pp. 319–324.

17. Andrews S. C., eds. Improving working memory: the effect of combining cognitive activity and an-odal transcranial direct current stimulation to the left dorsolateral prefrontal cortex. *Brain Stimulat*, 2011, vol. 4, no. 2, pp. 84–89.

18. Fazeli S. H. The Relationship between the Extraversion Trait and Use of the English Language Learn-ing Strategies. *Indian J. Sci. Technol.*, 2012, vol. 5, no. 4, pp. 2651-2657–2657.

19. Pelegrina S., eds. Normative data on the n-back task for children and young adolescents. *Front. Psychol*, 2015, vol. 6, pp. 1544.

20. Kublanov V. S., Babich M. V., Petrenko T. S. Novye printsipy organizatsii neiroreabilitatsii [New principles of organization of neurorehabilitation]. *Medicinskaja tehnika = Medical Equipment*, 2018, vol. 1(307), pp. 6–9.

Информация об авторах / Information about the Authors

Петренко Анна Александровна, старший преподаватель кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: a.a.petrenko@urfu.ru,
ORCID: 0000-0001-5906-5755,
Scopus ID: 57191362625

Anna A. Petrenko, Senior Lecturer of the Department of Radioelectronics and Telecommunications, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation,
e-mail: a.a.petrenko@urfu.ru,
ORCID: 0000-0001-5906-5755,
Scopus ID: 57191362625

Кубланов Владимир Семенович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация,
e-mail: kublanov@mail.ru,
Researcher ID: S-1066-2016,
ORCID: 0000-0001-6584-4544,
Scopus ID: 6508116175

Vladimir S. Kublanov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Radio-electronics and Telecommunications,
Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russian Fereration,
e-mail: kublanov@mail.ru
Researcher ID: S-1066-2016,
ORCID: 0000-0001-6584-4544,
Scopus ID: 6508116175

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-46-61

CC BY 4.0

Разработка интеллектуальной системы для прогнозирования рисков сердечно-сосудистых заболеваний

А. В. Малышев[1] ✉, Е. И. Пузырев[1], М. В. Прохоров[1], Н. Г. Нефедов[1]

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

✉ e-mail: alta76@yandex.ru

Резюме

Цель исследования *заключается в разработке системы прогнозирования рисков сердечно-сосудистых заболеваний по файлам формата EDF и изображениям кардиосигналов.*

Методы*. Для реализации программной системы был использован язык программирования Python версии 3.10. Прогнозирование рисков сердечно-сосудистых заболеваний происходит с помощью нейронных сетей, архитектура которых была выбрана со структурой многослойного персептрона с одним скрытым слоем. При разработке приложения использовались следующие библиотеки: PyEDFlib, Scikit-learn, SQLite3, PyQtGraph, Pandas, PyWavelets, Scipy, Pillow, OpenCV, Matplotlib. Входными данными программы являются EDF-файлы и изображения кардиосигналов форматов png, jpg, jpeg, bmp и svg.*

Результаты. *По итогу разработки программного продукта были разработаны интерфейс и архитектура программы. Разработаны и обучены две нейронные сети с общей структурой. Их обучение проводилось методом обратного распространения ошибки. Была разработана база данных для хранения информации о пациентах, заболеваниях и пороговых значениях. Реализованы алгоритмы прогнозирования, обучения нейронной сети, разделения кардиосигнала на PQRST-комплексы, считывания кардиосигнала с изображения и файла EDF.*

Заключение. *Разработанная программная система, позволяющае прогнозирования рисков сердечно-сосудистых заболеваний, позволит врачам ускорить диагностирование ССЗ и уменьшить время, затрачиваемое на оказание медицинских услуг пациентам, а также улучшить результаты ведения пациентов, находящихся в группе высокого риска. В дальнейшем разработанный программный продукт может быть улучшен и доработан новыми функциями: добавление новых для программной системы сердечно-сосудистых заболеваний и работа с ними, повышение точности прогнозирования, повышение качества считывания данных с изображений.*

Ключевые слова: *база данных; нейронные сети; кардиосигнал; сердечно-сосудистые заболевания; искусственный интеллект; кардиосигнал; пользователь; пациент; диагноз.*

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

Для цитирования: Разработка интеллектуальной системы для прогнозирования рисков сердечно-сосудистых заболеваний / А. В. Малышев, Е. И. Пузырев, М. В. Прохоров, Н. Г. Нефедов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 3. С. 46–61. https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-46-61.

Поступила в редакцию 10.06.2022 *Подписана в печать 15.07.2022* *Опубликована 30.09.2022*

© Малышев А. В., Пузырев Е. И., Прохоров М. В., Нефедов Н. Г., 2022

The Program of the Cardiovascular Disease Risk Prediction System

Alexdander V. Malyshev[1] ✉, Evgeny I. Puzyrev[1], Maxim V. Prokhorov[1], Nikita G. Nefedov[1]

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

✉ e-mail: alta76@yandex.ru

Abstract

The purpose of research *is to develop a system for predicting the risks of cardiovascular diseases based on EDF format files and images of cardiac signals.*

Methods. *To implement the software system, the Python programming language version 3.10 was used. The prediction of the risks of cardiovascular diseases occurs using neural networks, the architecture of which was chosen with the structure of a multilayer perceptron with one hidden layer. When developing the application, the following libraries were used: PyEDFlib, Scikit-learn, SQLite3, PyQtGraph, Pandas, PyWavelets, Scipy, Pillow, OpenCV, Matplotlib. The input data of the program are EDF files and images of cardiac signals in png, jpg, jpeg, bmp and svg formats.*

Results. *As a result of the development of the software product, the interface and architecture of the program were developed. Two neural networks with a common structure have been developed and trained. Their training was carried out by the method of back propagation of the error. A database has been developed to store information about patients, diseases and thresholds. Algorithms of forecasting, neural network training, division of a cardiac signal into PQRST complexes, reading of a cardiac signal from an image and an EDF file are implemented.*

Conclusion. *A software system has been developed that allows predicting the risks of cardiovascular diseases, which will allow doctors to speed up the diagnosis of CVD and reduce the time spent on providing medical services to patients, as well as improve the results of managing patients at high risk. In the future, the developed software product can be improved and refined with new functions: adding new ones for the cardiovascular diseases software system and working with them, improving the accuracy of forecasting, improving the quality of reading data from images.*

Keywords: *database; neural networks; cardiosignal; cardiovascular diseases; artificial intelligence; cardiosignal; user; patient; diagnosis.*

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

For citation: Malyshev A. V., Puzyrev E. I., Prokhorov M. V., Nefedov N. G.. The Program of the Cardiovascular Disease Risk Prediction System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022; 12(3): 46–61. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-46-61.

Received 10.06.2022 *Accepted 15.07.2022* *Published 30.09.2022*

Введение

На сегодняшний день в сфере здравоохранения активно внедряются различные процессы информатизации, направленные на разработку единого медицинского информационного пространства, с помощью которого врачи могут получить доступ к необходимым

технологиям, для взаимодействия с ними с рабочего места [1; 2; 3; 4; 5].

Использование ИТ в сфере медицины и здравоохранения существенно экономит время медицинских работников, что оказывает положительное влияние на количество и качество оказываемых услуг. Также благодаря развитию и внедрению ИТ повышается доступность медицинских услуг [6; 7; 8; 9].

Одной из главных причин смертности и инвалидности в большинстве стран современного мира, в том числе и в России, являются сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) [1; 10; 11].

Основная причина таких показателей – это низкое количество выявлений заболеваний на ранних стадиях и недостаточное следование пациентов рекомендациям врачей по профилактике сердечно-сосудистых заболеваний.

Выделяют два основных вида стратегий для проведения профилактики ССЗ. Первой является популяционная стратегия, представляющая собой мероприятия, направленные на большие массы людей, вторая – это стратегия высокого риска, сформированная на обнаружении патологий в максимально раннем состоянии у пациентов, находящихся в группе риска ССЗ с высокими показателями, и проведении с ними профилактических действий по максимальному снижению риска ССЗ.

Большую часть летальных и не летальных случаев заболевания можно предотвратить, предприняв меры по уменьшению риска развития ССЗ у пациентов, подверженных этому риску. В связи с этим возникает проблема создания интеллектуальной системы прогнозирования рисков сердечно-сосудистых заболеваний [8; 12; 13].

Большую перспективность в прогнозировании и обнаружении угроз здоровью человека показывают интеллектуальные системы, разработанные на основе технологий искусственного интеллекта и машинного обучения [14; 15; 16; 17; 18]. Также они улучшают результаты ведения пациентов, находящихся в группе высокого риска.

По мере совершенствования и улучшения интеллектуальных систем в IT-сфере работники медицинских учреждений получают все более мощный и точный инструмент для оказания пациентам качественной и своевременной медицинской помощи.

Материалы и методы

Для хранения и дальнейшего использования информации о пациентах, заболеваниях и пороговых значениях была разработана база данных (БД). На рисунке 1 представлена концептуальная модель данных программной системы в виде диаграммы «сущность – связь».

Функциональные требования к программной системе были реализованы в соответствии с требованиями пользователей.

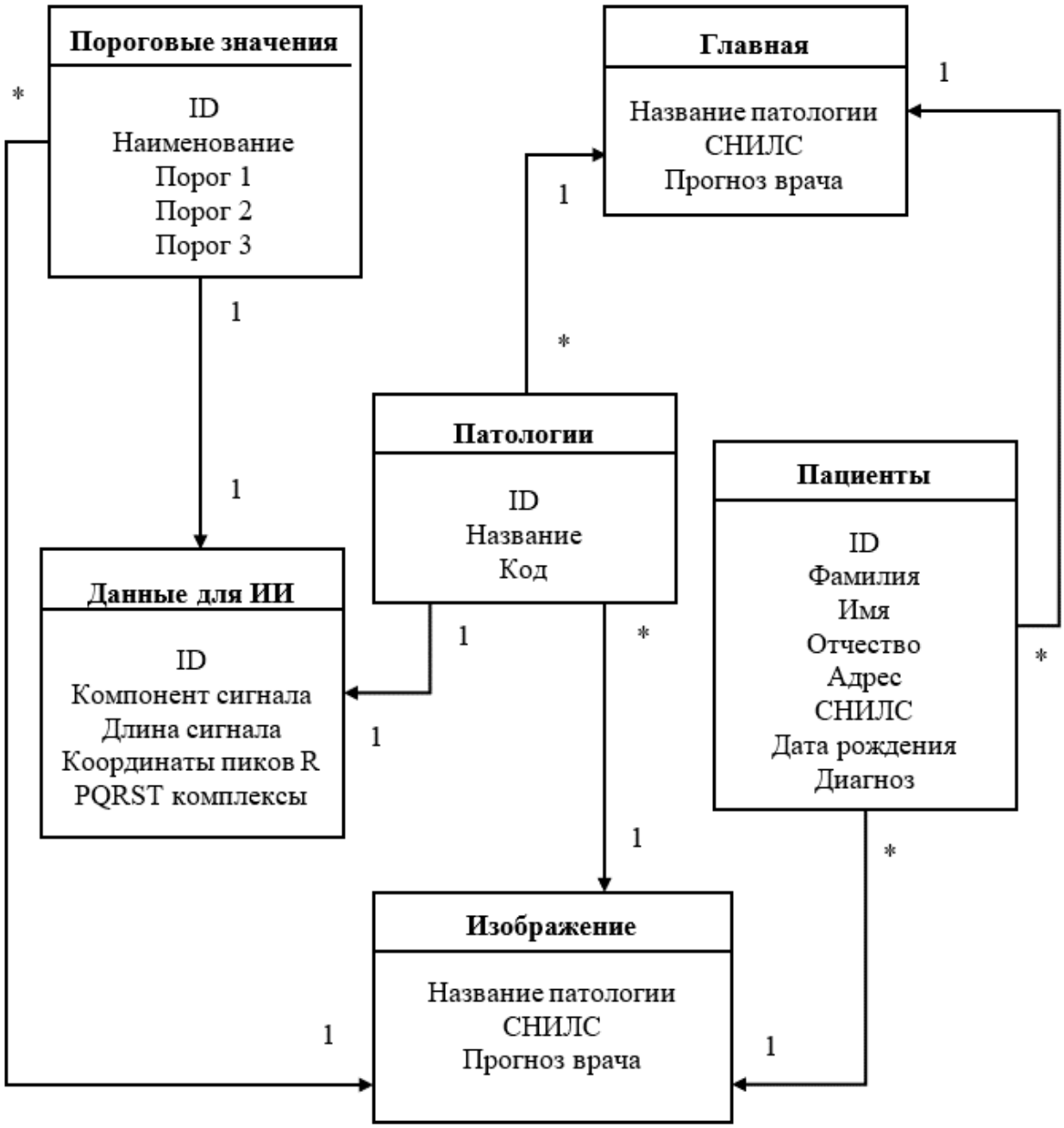


Рис. 1. Концептуальная модель данных

Fig. 1. Conceptual data model

Разработанное приложение реализует следующий функционал:

1. Выбор «идеального» изображения, с которым можно будет сравнивать загружаемые изображения кардиосигналов.

2. Возможность автоматического выбора «идеального» изображения для сравнения с загружаемыми изображениями.

3. Возможность выбора пороговых значений для обработки различных видов «идеальных» изображений.

4. Возможность выбора пороговых значений для обработки различных видов загружаемых изображений.

5. Возможность загружать в программу изображение с кардиосигналом.

6. Возможность сравнить комплексы зубцов кардиосигнала «идеального» изображения с комплексами загружаемого.

7. Возможность отдельного просмотра каждого комплекса зубцов PQRST-кардиосигнала.

8. Возможность поиска информации о пациенте в базе данных по номеру СНИЛС.

9. Возможность занести, изменить и сохранить диагноз пациента из базы данных.

10. Возможность спрогнозировать диагноз с помощью ИИ и его вывод на экран.

11. Загрузка EDF-файлов в программу.

12. Возможность выбрать нужное отведение.

13. Возможность указать длину кардиосигнала.

14. Возможность просмотра частоты сердцебиения.

15. Возможность добавлять данные и обучать ИИ работе с изображениями.

16. Возможность добавлять данные и обучать ИИ работе с кардиосигналами.

17. Возможность добавления, удаления, просмотра информации о пациентах в базе данных.

18. Возможность добавления, удаления, просмотра патологий в базе данных.

19. Возможность добавления в базу данных, удаления, просмотра в базе данных пороговых значений для обработки изображений.

На рисунке 2 представлена диаграмма прецедентов, на которой отображены функции программного продукта.

Для реализации программной системы прогнозирования рисков сердечно-сосудистых заболеваний была выбрана архитектура нейронной сети (НС) со структурой многослойного персептрона с одним скрытым слоем (рис. 3). Данная разновидность персептрона является наиболее подходящей и широко используемой в задачах классификации, поскольку такая архитектура нейронных сетей обладает свойством устойчивости к случайным шумам, возникающим в сигналах, и возможным случайным отказам компонентов сети (нейронов и весовых коэффициентов) [7; 16; 19; 20]. При этом отказ какого-либо компонента сети не влечет отказа всей НС в целом, а может незначительно отразиться на результате.

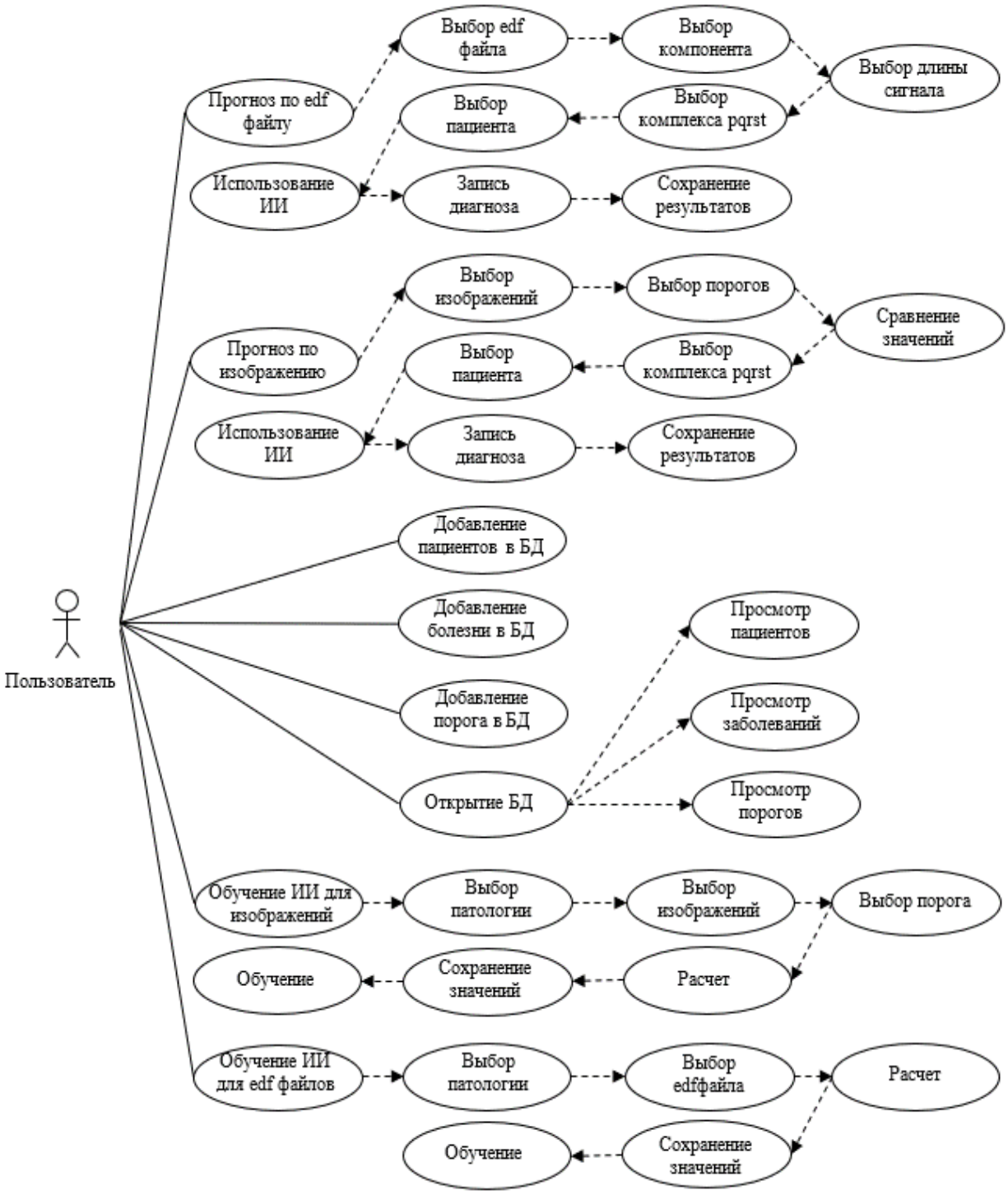


Рис. 2. Диаграмма вариантов использования программной системы

Fig. 2. Diagram of the use cases of the software system

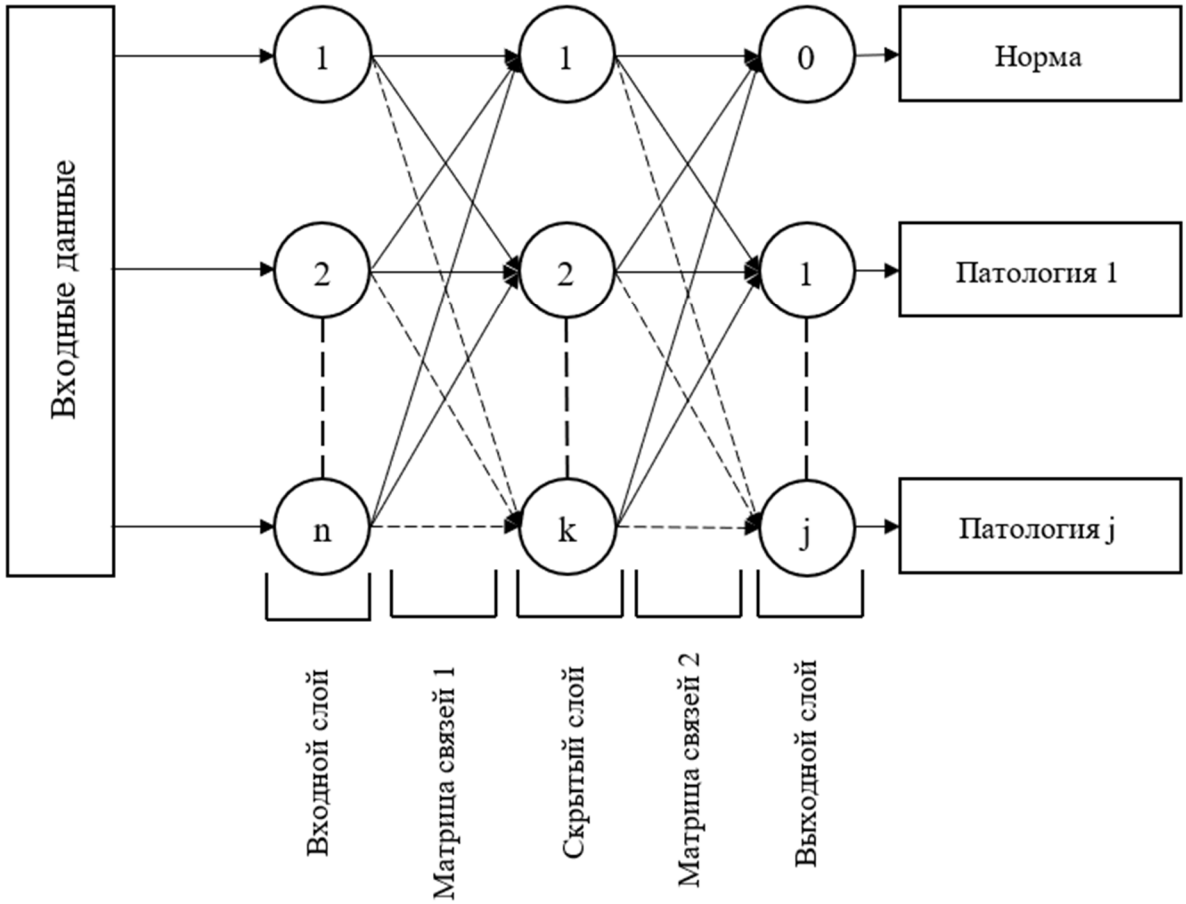


Рис. 3. Структура нейронной сети для программной системы

Fig. 3. Neural network structure for a software system

Входные данные представляют собой координаты точек, считаных с изображений и файлов формата EDF. Количество координат точек для изображения равно 100, а для EDF-файла – 600.

Обучение нейронной сети проводилось методом обратного распространения ошибки. Суть данного метода заключается в распространении сигналов ошибки в обратном направлении распространения сигналов в их обычном порядке функционирования. Реализация алгоритма предусматривает внесение изменений в вектор весов в том случае, если предъявляемый объект был неверно классифицирован. Сходимость алгоритма наступает при верной классификации всех объектов обучающей выборки, при этом запоминается соответствующий вектор весов.

Выходной и скрытый слои НС используют сигмоидальную функцию активации, которая описывается формулой вида

$$f(x) = \frac{1}{1+\exp(-\beta x)}, \qquad (1)$$

где параметр β определяет крутизну графика функции f(x).

Результаты и их обсуждение

Для разработки программного продукта была использована программная среда PyCharm. Такой выбор среды разработки обусловлен ее широким функционалом и отзывчивостью в процессе работы.

На рисунке 4 изображена диаграмма пакетов программной системы.

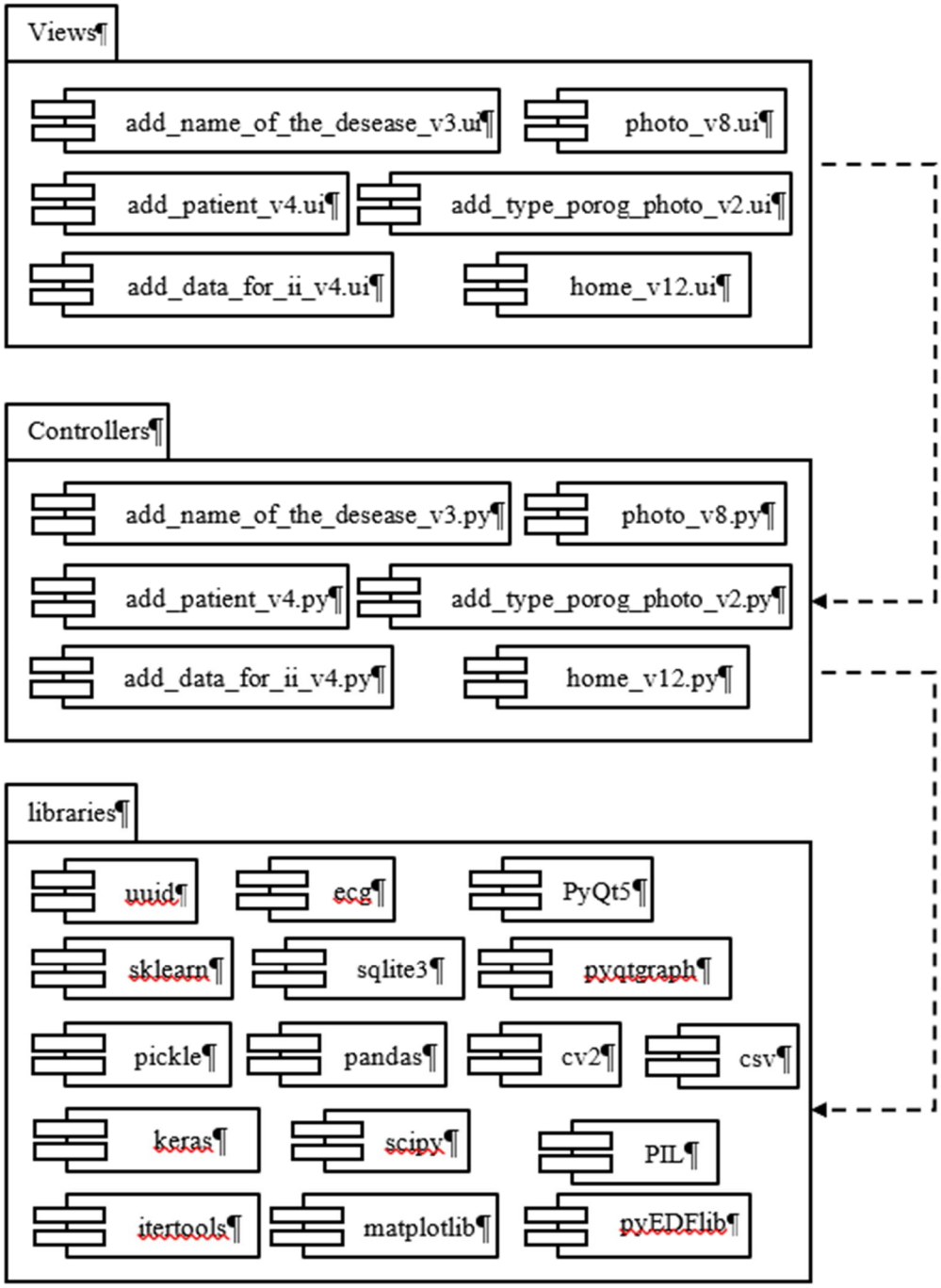


Рис. 4. Диаграмма пакетов программной системы

Fig. 4. Diagram of software system packages

При запуске программы перед пользователем открывается окно для работы с файлами формата EDF, которое является основным. На рисунке 5 продемонстрировано это окно с загруженным файлом.

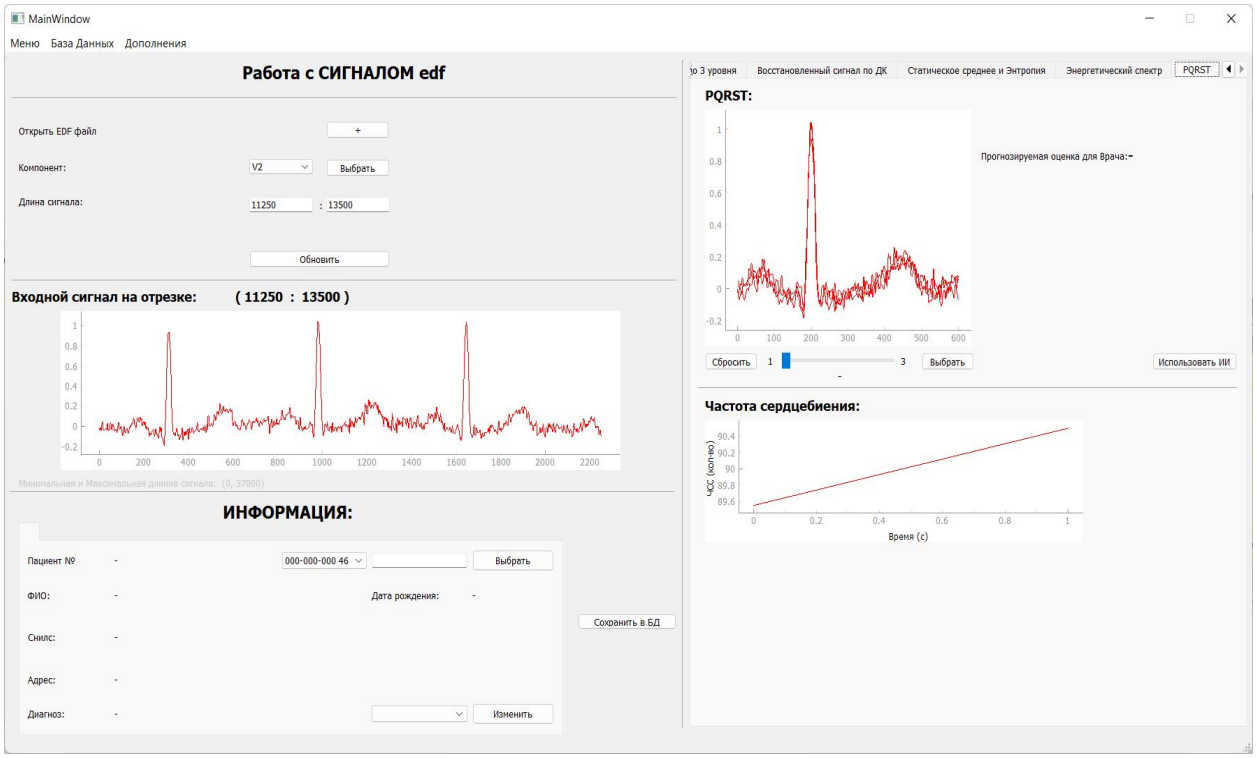


Рис. 5. Главное окно программы

Fig. 5. The main window of the program

Данное окно позволяет пользователю выбрать пользователю ему файл и указать необходимую длину кардиосигнала, после чего выбрать нужный PQRST-комплекс и использовать НС для получения диагноза. Затем пользователь может сохранить результат в базу данных.

Работа с изображениями происходит аналогично работе с файлами EDF.

Также у пользователя имеется возможность использовать операции CRUD для работы с БД.

База данных была реализована с помощью встраиваемой СУБД – SQLite3.

Например, на рисунке 6 представлены окна для добавления записей в базу данных.

На рисунке 7 продемонстрировано окно, позволяющее просматривать имеющиеся в БД записи.

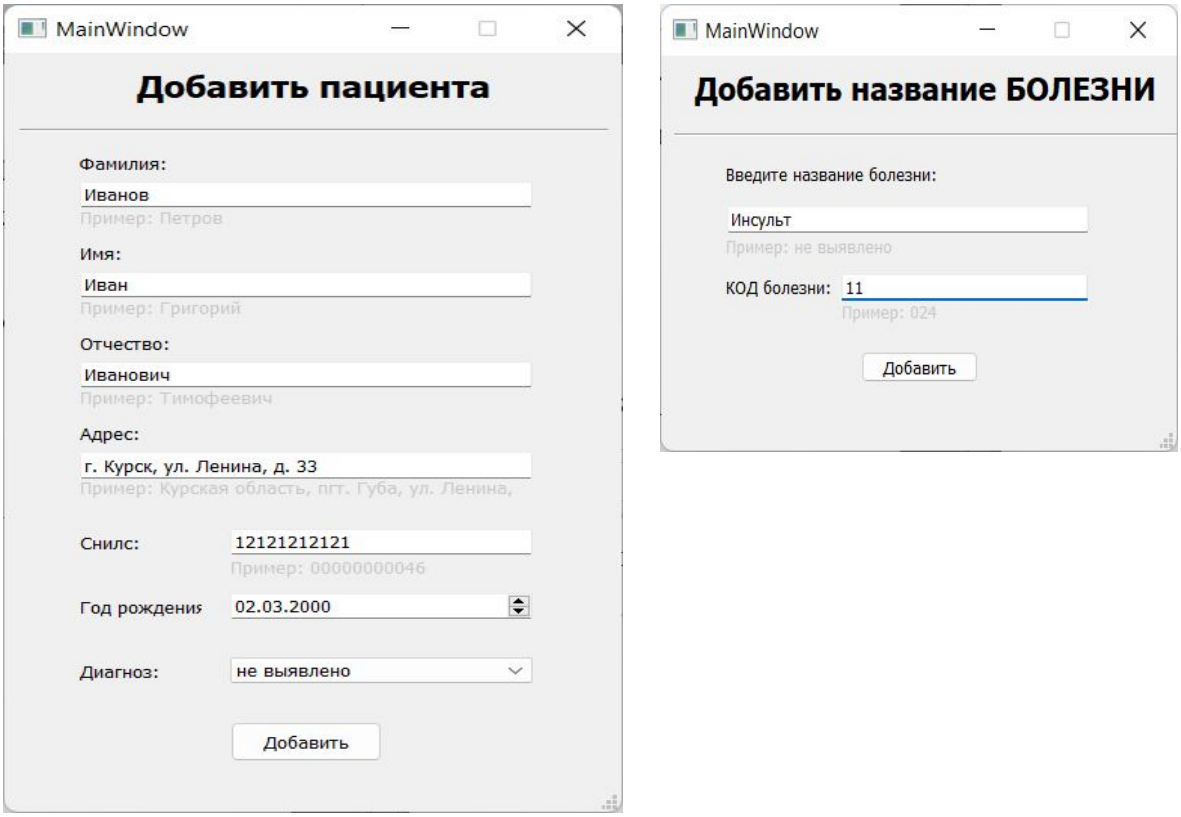
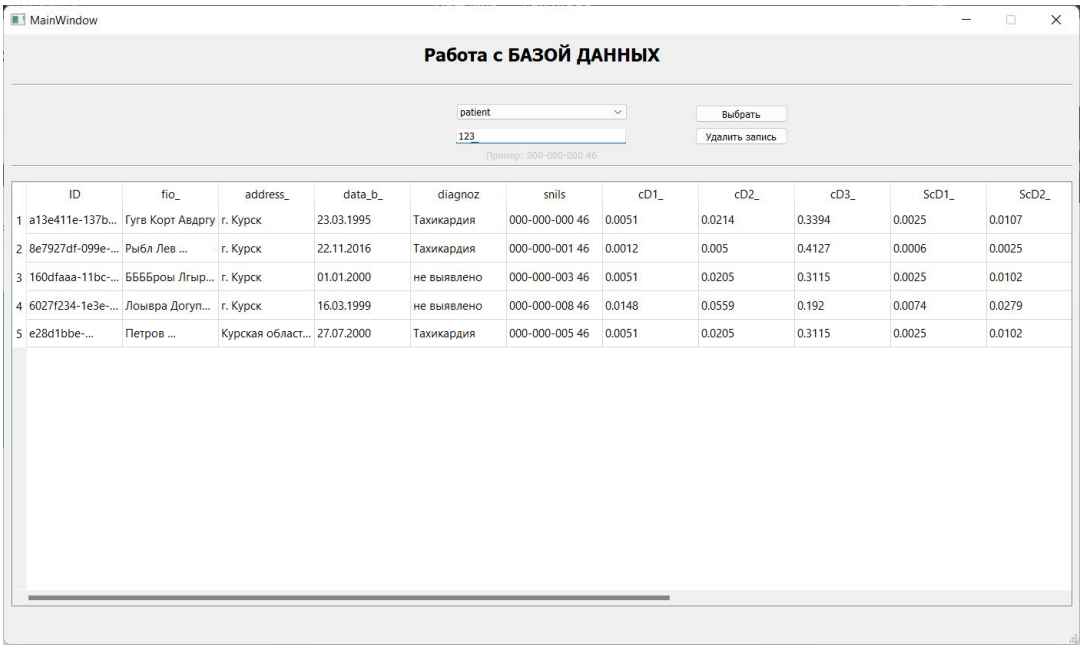


Рис. 6. Окна для добавления записей в базу данных

Fig. 6. Windows for adding records to the database



	ID	fio_	address_	data_b_	diagnoz	snils	cD1_	cD2_	cD3_	ScD1_	ScD2_
1	a13e411e-137b...	Гугв Корт Авдргу	г. Курск	23.03.1995	Тахикардия	000-000-000 46	0.0051	0.0214	0.3394	0.0025	0.0107
2	8e7927df-099e-...	Рыбл Лев ...	г. Курск	22.11.2016	Тахикардия	000-000-001 46	0.0012	0.005	0.4127	0.0006	0.0025
3	160dfaaa-11bc-...	ББББроы Лгыр...	г. Курск	01.01.2000	не выявлено	000-000-003 46	0.0051	0.0205	0.3115	0.0025	0.0102
4	6027f234-1e3e-...	Лоывра Догуп...	г. Курск	16.03.1999	не выявлено	000-000-008 46	0.0148	0.0559	0.192	0.0074	0.0279
5	e28d1bbe-...	Петров ...	Курская област...	27.07.2000	Тахикардия	000-000-005 46	0.0051	0.0205	0.3115	0.0025	0.0102

Рис. 7. Окно для работы с БД

Fig. 7. The window for working with the database

Выводы

В ходе работы над проектом была создана программная система, позволяющая определить по кардиосигналу с изображения или файлу формата EDF, имеются ли у пациента сердечно-сосудистые заболевания.

В будущем разработанная программная система может быть модернизирована и доработана новым функционалом:

– расширение списка ССЗ, которые может распознать система;

– повышение точности прогнозирования;

– улучшение считывания данных с изображений;

– добавление возможности работы с другими видами данных.

Данное приложение может быть использовано в различных медицинских организаций, в которых оказывается лечебно-диагностическая помощь пациентам с сердечно-сосудистыми заболеваниями. Программа позволит врачам ускорить диагностирование ССЗ и уменьшить время, затрачиваемое на оказание медицинских услуг пациентам, а также улучшить результаты ведения пациентов, находящихся в группе высокого риска.

Список литературы

1. Орлов В. Н. Руководство по электрокардиографии. 9-е изд., испр. М.: Медицинское информационное агентство, 2017. 560 с.

2. Модели латентных предикторов в интеллектуальных системах прогнозирования состояния живых систем / А. В. Кисилев, О. В. Шаталова, З. У. Протасова, С. А. Филист [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 114-133.

3. Колтун М. А., Сапон К. С. Некоторые проблемы автоматизации задач в сфере здравоохранения // Аллея науки. 2018. № 1. С. 838-840.

4. Томакова Р. А. Программное обеспечение анализа плохоструктурированных изображений в пакете MATLAB для медицинских приложений // Ученые записки Российского государственного социального университета. 2012. № 2 (102). С. 350-354.

5. Шералиев И. И. Информационные технологии и их применение в современной медицине // ACADEMY. 2020. № 3(54). С. 61-63.

6. Гудфеллоу Я. Глубокое обучение. 2-е изд., испр. М.: ДМК Пресс, 2018. 652 с.

7. Еникеева З. А., Рафиков, Д. С. Прогнозирования риска развития сердечно-сосудистых заболеваний с помощью полносвязной глубокой нейронной сети // StudNet. 2022. № 7. С. 7274-7283.

8. Гусев А. В., Кузнецова Т. Ю., Корсаков И. Н. Искусственный интеллект в оценке рисков развития сердечно-сосудистых заболеваний // Российский журнал телемедицины и электронного здравоохранения. 2018. № 3. 85-90.

9. Нейросетевые модули с виртуальными потоками для классификации и прогнозирования функционального состояния сложных систем / А. В. Киселев, Т. В. Петрова, С. В. Дегтярев, А. Ф. Рыбочкин, С. А. Филист, О. В. Шаталова, В. Н. Мишустин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. № 4 (79). С. 123-134.

10. Кисилев А. В., Филист С. А., Шаталова О. В. Метод синтеза гетерогенных математических моделей прогнозирования рецидивов инфаркта миокарда в реабилитационном периоде // Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес (ИНФОС-2019): сборник материалов X Международной научно-технической конференции / Вологодский государственный университет. Вологда, 2019. С. 28-31.

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

12. Предикторы синхронности системных ритмов живых систем для классификаторов их функциональных состояний / Т. В. Петрова, С. А. Филист, С. В. Дегтярев, А. В. Киселев [и др.] // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2018. Т. 17, № 3. С. 693-700.

13. The use of Fourier Descriptors for the Classification and Analysis of Peripheral blood Smears Image / R. Tomakova, V. Komkov, E. Emelianov, V. Tomakov // Applications of Mathematics. 2017. Vol. 8. P. 1563.

14. Джулли А. Библиотека Keras – инструмент глубокого обучения. Реализация нейронных сетей с помощью библиотек Theano и tensorFlow. М.: ДМК Пресс, 2018. 294 с.

15. Борисовский С. А., Брежнева А. Н., Томакова Р. А. Нейросетевые модели с иерархическим пространством информативных признаков для сегментации плохоструктурированных изображений // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. № 2. С. 49-53.

16. Джоши П. Искусственный интеллект с примерами на Python. СПб.: Диалектика, 2019. 448 с.

17. Методы и алгоритмы контурного анализа для задач классификации сложноструктурируемых изображений / М. В. Дюдин, А. Д. Поваляев, Е. С. Подвальный, Р. А. Томакова // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10, № 3-1. С. 54-59.

18. Tomakova R. A., Filist S. A., Pykhtin A. I. Development and Research of Methods and Algorithms for Intelligent Systems for Complex Structured Images Classification // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12, N 22. P. 6039-6041.

19. Любанович Б. Простой Python. Современный стиль программирования. СПб.: Питер, 2021. 592 с.

20. Белик А. Г., Цыганенко В. Н. Проектирование и архитектура программных систем. Омск: ОмГТУ, 2016. 96 с.

References

1. Orlov V. N. Rukovodstvo po e`lektrokardiografii [Manual of electrocardiography]. 9th ed. Moscow, Medicinskoe informacionnoe agentstvo Publ., 2017. 560 p.

2. Kisilev A. V., Shatalova O. V., Protasova Z. U., Filist S. A., eds. Modeli latentny`x prediktorov v intellektual`ny`x sistemax prognozirovaniya sostoyaniya zhivy`x system [Models of latent predictors in intelligent systems for predicting the state of living systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 114-133.

3. Koltun M. A., Sapon K. S. Nekotory`e problemy` avtomatizacii zadach v sfere zdravooxraneniya [Some problems of automation of tasks in the field of healthcare]. *Alleya nauki = Alley of Science*, 2018, no. 1, pp. 838-840.

4. Tomakova R. A. Programmnoe obespechenie analiza ploxostrukturirovanny`x izobrazhenij v pakete MATLAB dlya medicinskix prilozhenij [Software for the analysis of poorly structured images in the MATLAB package for medical applications]. *Ucheny`e zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo social`nogo universiteta = Scientific Notes of the Russian State Social University*, 2012, no. 2 (102), pp. 350-354.

5. Sheraliev I. I. Informacionny`e texnologii i ix primenenie v sovremennoj medicine [Information technologies and their application in modern medicine]. *ACADEMY*, 2020, no. 3(54), pp. 861-63.

6. Gudfellou Ya. Glubokoe obuchenie [Forecasting the risk of developing cardiovascular diseases using a fully connected deep neural network]. 2nd ed. Moscow, DMK Press, 2018. 652 p.

7. Enikeeva Z. A., Rafikov D. S. Prognozirovaniya riska razvitiya serdechno-sosudisty`x zabolevanij s pomoshh`yu polnosvyaznoj glubokoj nejronnoj seti [Forecasting the risk of developing cardiovascular diseases using a fully connected deep neural network]. *StudNet*, 2022, no. 7, pp. 7274-7283.

8. Gusev A. V., Kuzneczova T. Yu., Korsakov I. N. Iskusstvenny`j intellekt v ocenke riskov razvitiya serdechno-sosudisty`x zabolevanij [Artificial intelligence in assessing the risks of developing cardiovascular diseases]. *Rossijskij zhurnal telemediciny` i e`lektronnogo zdravooxraneniya = Russian Journal of Telemedicine and E-Health*, 2018, no. 3, pp. 85-90.

9. Kisilev A. V., Petrova T. V., Degtyarev S. V., Ry`bochkin A. F., Filist S. A., Shatalova O. V., Mishustin V. N. Nejrosetevy`e moduli s virtual`ny`mi potokami dlya klassifikacii i prognozirovaniya funkcional`nogo sostoyaniya slozhny`x system [Neural network modules with virtual flows for classification and prediction of the functional state of complex systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, no. 4 (79), pp. 123-134.

10. Kisilev A. V., Filist S. A., Shatalova O. V. [Method of synthesis of heterogeneous mathematical models for predicting recurrence of myocardial infarction in the rehabilitation period]. *Intellektual`no-informacionny`e texnologii i intellektual`ny`j biznes (INFOS-2019). Sbornik materialov desyatoj mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii* [Intellectual and information technologies and intellectual business (INFOS-2019). Collection of materials of the tenth International Scientific-technical conference]. Vologda, Vologda State University Publ., 2019, pp. 28-31. (In Russ.)

11. Efremov M. A., Filist S. A., Shatalova O. V., eds. Gibridnye nechetki modeli dlya prognozirovaniya vozniknoveniya i oslozhnenii arterial'noi gipertenzii s uchetom energeticheskikh kharakteristik bioaktivnykh tochek [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. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2018, vol. 8, no. 4 (29), pp. 104-119.

12. Petrova T. V., Filist S. A., Degtyarev S. V., Kiselev A. V., eds. Prediktory sinkhronnosti sistemnykh ritmov zhivykh sistem dlya klassi-fikatorov ikh funktsional'nykh sostoyanii [Predictors of synchronicity of systemic rhythms of living systems for classifiers of their functional states]. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2018, vol. 17, no. 3, pp. 693-700.

13. Tomakova R., Komkov V., Emelianov E., Tomakov V. The use of Fourier Descriptors for the Classification and Analysis of Peripheral blood Smears Image. *Applications of Mathematics*, 2017, vol. 8, pp. 1563.

14. Dzhulli A. Biblioteka Keras – instrument glubokogo obucheniya. Realizatsiya neironnykh setei s pomoshch'yu bibliotek Theano i tensorFlow [The Keras Library is a deep learning tool. Implementation of neural networks using Theano and TensorFlow libraries]. Moscow, DMK Press, 2019. 448 p.

15. Borisovskij S. A., Brezhneva A. N., Tomakova R. A. Nejrosetevy`e modeli s ierarxicheskim prostranstvom informativny`x priznakov dlya segmentacii ploxostrukturirovanny`x izobrazhenij [Neural network models with a hierarchical space of informative features for segmentation of poorly structured images]. *Biomedicinskaya radioe`lektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2010, no. 2, pp. 49-53.

16. Dzhoshi P. Iskusstvennyi intellekt s primerami na Python [Artificial intelligence with examples in Python]. St. Petersburg, Dialectics Publ., 2019. 448 p.

17. Dyudin M. V., Povalyaev A. D., Podval`ny`j E. S., Tomakova R. A. Metody` i algoritmy` konturnogo analiza dlya zadach klassifikacii slozhnostrukturiruemy`x izobrazhenij [Methods and algorithms of contour analysis for classification problems of complex structured images]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2014, vol. 10, no. 3-1, pp. 54-59.

18. Tomakova R. A., Filist S. A., Pykhtin A. I. Development and Research of Methods and Algorithms for Intelligent Systems for Complex Structured Images Classification. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12, no. 22, pp. 6039-6041.

19. Lyubanovich B. Prostoj Python. Sovremenny`j stil` programmirovaniya [Simple Python. Modern programming style]. St. Petersburg, Piter Publ., 2021. 592 p.

20. Belik A. G. Proektirovanie i arxitektura programmny`x sistem [Design and architecture of software systems]. Omsk, OmGTU Publ., 2016. 96 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Малышев Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: alta76@yandex.ru

Alexander V. Malyshev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: alta76@yandex.ru

Пузырев Евгений Игоревич, магистрант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: puzyryov2000@mail.ru

Evgeny I. Puzyrev, Undergraduate, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: puzyryov2000@mail.ru

Прохоров Максим Владимирович, магистрант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: maxim46rus6@yandex.ru

Maxim V. Prokhorov, Undergraduate, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: maxim46rus6@yandex.ru

Нефедов Никита Геннадьевич, магистрант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: niknefed@gmail.com

Nikita G. Nefedov, Undergraduate, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: niknefed@gmail.ru

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-62-79

CC BY 4.0

Уточнение параметров отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории, измеренных средствами инерциальной навигации, по изображениям подстилающей поверхности

В. Г. Андронов[1] ✉, А. А. Чуев [1], И. С. Юдин [1], Н. С. Дубровский [1]

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

✉ e-mail: vladia58@mail.ru

Резюме

Цель исследования *– разработка методики, обеспечивающей уточнение инерциальных измерений параметров отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории по параллаксам изображений подстилающей поверхности.*

Методы*. Для математического описания процедур уточнения использовалась математическая модель параметров отклонений, устанавливающая функциональную связь между этими параметрами, плоскими координатами соответственных точек и параллаксами перекрывающихся изображений подстилающей поверхности. Решение нелинейной системы уравнений, описывающих эту функциональную связь, выполнялось по методу наименьших квадратов с оценкой точности полученных результатов.*

Результаты. *Разработана методика уточнения параметров отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории на основе автономной фотограмметрической обработки перекрывающихся изображений подстилающей поверхности. Выполнена линеаризация и описана процедура решения системы нелинейных уравнений, описывающих модель параметров отклонений. Получены аналитические соотношения для апостериорной оценки точности получаемых результатов.*

Заключение. *Разработанная методика обеспечивает уточнение значений некоординированных отклонений маршрута полёта беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории, измеренных средствами инерциальной навигации в условиях потери сигналов от навигационных спутников. Предложенный подход по сравнению с известными методиками позволяет уменьшить в три раза число обрабатываемых соответственных точек на перекрывающихся изображениях. Это позволяет существенно снизить уровень вычислительных и ресурсных затрат, что имеет большое значение для использования разработанной методики на борту малоразмерных беспилотных летательных аппаратов.*

© Андронов В. Г., Чуев А. А., Юдин И. С., Дубровский Н. С., 2022

Ключевые слова: *автономная навигация; беспилотный летательный аппарат; параллакс изображений; аэрофотосъёмка.*

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

Для цитирования: Уточнение параметров отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории, измеренных средствами инерциальной навигации, по изображениям подстилающей поверхности / В. Г. Андронов, А. А. Чуев, И. С. Юдин, Н. С. Дубровский // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 3. С. 63–79. https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-62-79.

Поступила в редакцию 20.06.2022 *Подписана в печать 27.07.2022* *Опубликована 30.09.2022*

Specification of Parameters of Deviations of Unmanned Aerial Vehicles from a Given Trajectory, Measured by Means of Inertial Navigation, from Images of the Underlying Surface

Vladimir G. Andronov[1] ✉, Andrey A. Chuev[1], Ilya S. Yudin[1], Nikita S. Dubrovsky[1]

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

✉ e-mail: vladia58@mail.ru

Abstract

Purpose of research *is development of a technique providing specification of inertial measurements of parameters of deviations of unmanned aerial vehicles from a given trajectory by parallax images of the underlying surface.*
Methods. *For the mathematical description of the specification procedures, a mathematical model of deviation parameters was used, establishing a functional relationship between these parameters, the plane coordinates of the corresponding points and the parallaxes of overlapping images of the underlying surface. The nonlinear system of equations describing this functional relationship was solved using the least squares method with an estimate of the accuracy of the results obtained.*
Results. *A technique has been developed to specify the parameters of deviations of unmanned aerial vehicles from a given trajectory based on autonomic photogrammetric processing of overlapping images of the underlying surface. Linearization is performed and a procedure for solving a system of nonlinear equations describing a model of deviation parameters is described. Analytical relations for a posteriori estimation of the accuracy of the obtained results are obtained.*
Conclusion. *The developed technique provides clarification of the values of uncoordinated deviations of the flight route of unmanned aerial vehicles from a given trajectory, measured by means of inertial navigation in conditions of loss of signals from navigation satellites. The proposed approach, in comparison with known methods, makes it possible to reduce the number of processes corresponding to points on overlapping images by three times. This makes it possible to significantly reduce the level of computational and resource costs that the developed methodology has, provides a specification that is of great importance for using the developed methodology on board small-sized unmanned aerial vehicles.*

Keywords: *autonomous navigation; unmanned aerial vehicle; parallax images; aerial photography.*

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

For citation: Andronov V. G., Chuev A. A., Yudin I. S., Dubrovsky N. S. Specification of Parameters of Deviations of Unmanned Aerial Vehicles from a Given Trajectory, Measured by Means of Inertial Navigation, from Images of the Underlying Surface. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022; 12(3): 62–79. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-62-79.

Received 20.06.2022 *Accepted 27.07.2022* *Published 30.09.2022*

***

Введение

В настоящее время для решения различных целевых задач всё более широкое распространение получают малоразмерные (мини) беспилотные летательные аппараты (БЛА). Одной их важнейших задач, стоящей перед системой навигации БЛА для обеспечения их автономного полёта, является обнаружение и определение величины некоординированных отклонений от заданной траектории. Здесь и далее под некоординированными отклонениями понимается изменение маршрута полёта БЛА в условиях отсутствия намеренных маневров по углам тангажа, крена и рыскания, возникающее вследствие внешнего возмущения (прерывистые порывы ветра, восходящий поток, воздушная яма и т. п.).

Для решения этой задачи используется контур инерциальной навигации, который обеспечивает получение автономной информации о текущем положении и ориентации БЛА. Основным недостатком таких систем является зависимость точности от длительности автономной работы, что обусловлено присущим им накоплением ошибок инерциальных измерений. При этом наиболее высокая скорость накапливания ошибок характерна для мини-БЛА, которая уже через несколько минут автономного полёта приводит к ухудшению точности инерциальных измерений в два-три раза [1]. Поэтому на практике система инерциальной навигации мини-БЛА, как правило, интегрируется с датчиками спутниковой навигационной системы [2]. Вместе с тем известно [3; 4; 5; 6; 7; 8], что в процессе полёта любого летательного аппарата возможна потеря сигналов от навигационных спутников. Понятно, что это может привести к значительным отклонениям маршрута полёта мини-БЛА от заданной траектории и снижению эффективности его целевого применения. В этой связи актуальной является задача уточнения инерциальных измерений ориентации и положения БЛА по дополнительной информации. Для её решения при наличии требований к автономности этой информации широко применяются различные методы обработки изображений подстилающей поверхности. При этом используются те-

кущие полутоновые изображения, получаемые от установленной на борту БЛА цифровой фотокамеры, и/или полученные ранее различные типы эталонных изображений, в т. ч. цифровые карты местности [9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16].

В данной работе рассматривается методика уточнения инерциальных измерений ориентации и положения БЛА, которая основана на обработке только текущих перекрывающихся полутоновых изображений подстилающей поверхности.

Будем считать, что заданная штатная траектория движения БЛА представляет собой прямолинейный горизонтальный маршрут, который определяется как отсутствие программных маневров по углам тангажа ν, крена ω и рыскания τ.

После выхода БЛА на заданную траекторию цифровой фотокамерой производится непрерывная регистрация и обработка перекрывающихся изображений $j = \overline{1,J}$ подстилающей поверхности (рис.1), а системой навигации производятся инерциальные измерения углов ν, ω, τ и коррекция их значений по сигналам навигационных спутников.

Материалы и методы

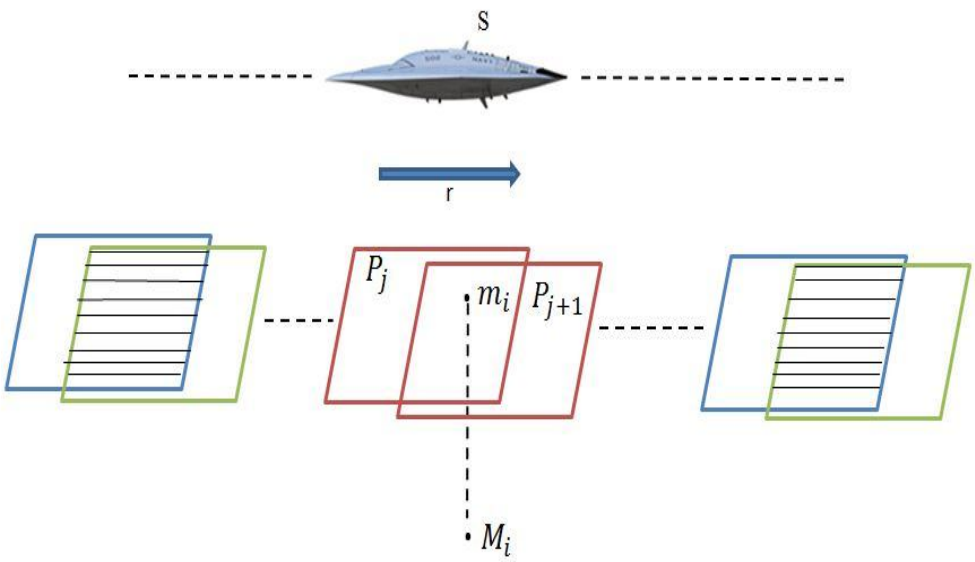


Рис. 1. Режим горизонтального полёта БЛА

Fig. 1. UAV horizontal flight mode

При этом обработка изображений заключается в нахождении корреляционными методами изображений точек земной поверхности M_i в зонах перекрытия смежных изображений P_j, P_{j+1} и автоматическом определении следующих параметров:

– плоских координат $\left\{(x_i^{(j)}, y_i^{(j)}), (x_i^{(j+1)}, y_i^{(j+1)})\right\}$ точек $\{m_i\}$ в системах координат изображений;

– продольных $p_i^{(j,j+1)} = x_i^{(j)} - x_i^{(j+1)}$ и поперечных $q_i^{(j,j+1)} = y_i^{(j)} - y_i^{(j+1)}$ параллаксов.

Поскольку для перекрывающихся горизонтальных снимков, полученных с одной высоты полёта БЛА, справедливы соотношения [17]

$$\begin{cases} p_{ш} = p_i^{(j,j+1)} = x_i^{(j)} - x_i^{(j+1)} = const, \\ q_{ш} = q_i^{(j,j+1)} = y_i^{(j)} - y_i^{(j+1)} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

очевидно, что отличие от нуля значений разниц продольных и поперечных параллаксов смежных пар изображений свидетельствуют о возникновении некоординированных отклонений БЛА.

Учитывая изложенное, предположим далее, что в какой-то момент времени произошла потеря сигналов от навигационных спутников и в этих условиях возникли некоординированные отклонения маршрута полёта БЛА. В этом случае из некоторых смежных центров проекций S_1, S_2 (рис. 2) цифровой фотокамеры будут получены перекрывающиеся изображения P_1 и P_2.

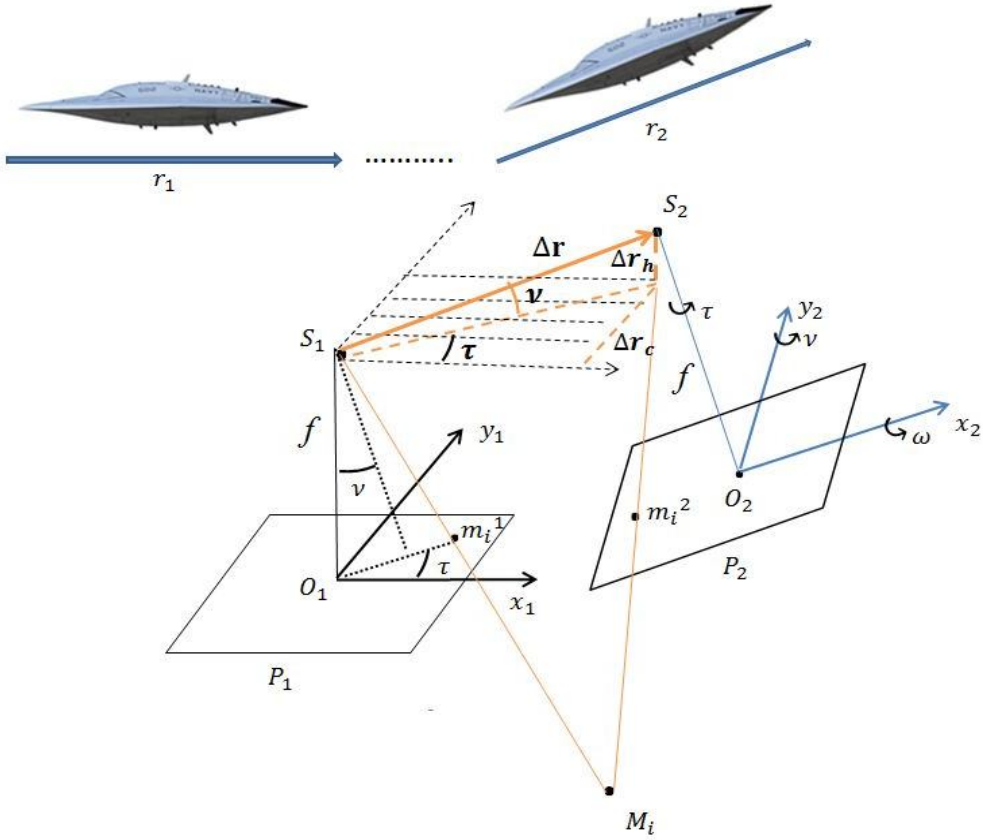


Рис. 2. Взаимная ориентация изображений P_1 и P_2

Fig. 2. Mutual orientation of images P_1 и P_2

Очевидно, что изображение P_1 будет получено в режиме горизонтального полёта по траектории r_1, а P_2 – в условиях отклонений БЛА и выхода на траекторию r_2. Здесь и далее изображение P_1 будем называть горизонтальным, а P_2 – наклонным. Введём следующие параметры, характеризующие как величину, так и направления отклонений БЛА от заданной траектории r_1.

Угол тангажа ν – угол между продольной осью БЛА, совпадающей с траекторией r_2 и траекторией r_1, параллельной плоскости местного горизонта; угол крена ω – угол между поперечной осью БЛА и плоскостью местного горизонта; угол рыскания τ – угол между продольной осью БЛА при горизонтальной траектории полёта БЛА и её проекцией на горизонтальную плоскость при наклонной траектории.

На рисунке 2 видно, что угловые параметры отклонений БЛА от заданной траектории горизонтального полёта совпадают с параметрами взаимной ориентации снимков P_1 и P_2.

$\Delta r_c = \Delta r_S \operatorname{tg}\tau$ – отклонения траектории r_2 от r_1 по направлению полёта БЛА; $\Delta r_h = \Delta r_S\,(\operatorname{tg}\nu/\cos\tau)$ – отклонения траектории r_2 от r_1 по высоте полёта БЛА, где Δr_S – расстояние между центрами проекций S_1 и S_2 в плоскости местного горизонта.

По условиям задачи будем считать, что с требуемой точностью известны следующие параметры:

– продольный и поперечный параллаксы $p_{ш}, q_{ш}$ перекрывающихся изображений, полученных в штатном режиме горизонтального полёта;

– плоские координаты

$$\left\{<(x_i^{(1)}, y_i^{(1)})>, <(x_i^{(2)}, y_i^{(2)})> \mid i = \overline{1, I}\right\}$$

точек земной поверхности M_i, изобразившихся в точках $m_i{}^{(1)}$ и $m_i{}^{(2)}$ зоны перекрытия изображений P_1 и P_2;

– разницы значений $\Delta p_i, \Delta q_i$ продольных и поперечных параллаксов

– изображений P_1, P_2 и горизонтальных изображений P_j, P_{j+1}, полученных в штатном режиме горизонтального полёта;

– фокусное расстояние f цифровой камеры;

– расстояние Δr_S между центрами проекций S_1 и S_2 в плоскости местного горизонта.

При этом будем полагать, что после потери сигналов от навигационных спутников погрешности измерений углов ν, ω, τ в контуре инерциальной навигации превышают допустимый уровень и требуют уточнения.

Тогда задачу уточнения значений углов тангажа ν, крена ω и рыскания τ БЛА, измеренных средствами инерциальной навигации после потери сигналов от навигационных спутников, можно свести к задаче уточнения приближённо известных значений углов взаимной ориентации горизонтального и наклонного изображений P_1 и P_2.

С этой целью воспользуемся математической моделью параметров отклонений БЛА от заданной траектории, полученной авторами в работе [17], которая с учётом принятых выше обозначений примет следующий вид:

$$\begin{cases} \Delta p_i = \frac{1}{2}x_i^{(2)}(\omega^2 - \tau^2) + f\nu - y_i^{(2)}\tau + x_i^{(2)}\nu^2 + \\ + \frac{(x_i^{(2)})^2}{f}(\nu + \omega\tau) - \frac{(y_i^{(2)})^2}{f}\omega\tau + \frac{x_i^{(2)}y_i^{(2)}}{f}(\omega - 2\nu\tau); \\ \Delta q_i = y_i^{(2)}\frac{1}{2}(\nu^2 - \tau^2) + f\omega + x_i^{(2)}(\nu\omega - \tau) + y_i^{(2)}\omega^2 + \\ + \frac{(y_i^{(2)})^2}{f}(\omega - \nu\tau) + \frac{x_i^{(2)}}{f}\nu\tau + \frac{x_i^{(2)}y_i^{(2)}}{f}(\nu + 2\omega\tau). \end{cases} \quad (2)$$

Выражение (2) устанавливает функциональную связь параметров ν, ω, τ взаимной ориентации изображений P_1 и P_2 с плоскими координатами $x_i^{(2)}, y_i^{(2)}$ i-й точки на наклонном снимке P_2, попадающей в зону его перекрытия со смежным горизонтальным снимком P_1, и разностью параллаксов $\Delta p_i, \Delta q_i$ перекрывающихся изображений подстилающей поверхности.

Модель (2), в отличие от известных моделей, построенных на основе принципа коллинеарности векторов S_1S_2, S_1M_i и S_2M_i (см. рис. 2) и формализованных в виде сложного функционала с пятью подлежащими оценке параметрами [17; 18; 19], представляет собой систему двух нелинейных уравнений с тремя неизвестными. Это даёт возможность сократить в три раза число соответственных точек, которые необходимо выделить в зоне перекрытия пары снимков для организации корректной математической обработки результатов измерений. Очевидно, что это, в свою очередь, позволяет существенно снизить уровень вычислительных и ресурсных затрат.

Для решения поставленной задачи разложим нелинейные уравнения (2) в ряд Тейлора и, ограничившись только линейными членами, получим

$$d(\Delta p_i) = \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial\nu}d\nu + \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial\omega}d\omega + \\ + \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial\tau}d\tau,$$

$$d(\Delta q_i) = \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial\nu}d\nu + \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial\omega}d\omega + \\ + \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial\tau}d\tau.$$

Представим эту систему линеаризованных уравнений в матрично-векторной форме:

$$\begin{bmatrix} d(\Delta p_i) \\ d(\Delta q_i) \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial\nu} & \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial\omega} & \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial\tau} \\ \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial\nu} & \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial\omega} & \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial\tau} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} d\nu \\ \partial\omega \\ d\tau \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Дифференцируя уравнения (2), найдём частные производные:

$$\frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \nu} = 2x_i^{(2)}\nu - 2\frac{x_i^{(2)}y_i^{(2)}}{f}\tau + \left(f + \frac{(x_i^{(2)})^2}{f}\right),$$

$$\frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \omega} = x_i^{(2)}\omega + \left(\frac{x_i^{(2)} - y_i^{(2)}}{f}\right)\tau + \frac{x_i^{(2)}y_i^{(2)}}{f},$$

$$\frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \tau} = -2\frac{x_i^{(2)}y_i^{(2)}}{f}\nu + (\left(\frac{x_i^{(2)} - y_i^{(2)}}{f}\right)\omega + x_i^{(2)}\tau - y_i^{(2)},$$

$$\frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \nu} = y_i^{(2)}\nu + x_i^{(2)}\omega + \left(\frac{x_i^{(2)} - y_i^{(2)}}{f}\right)\tau + \frac{x_i^{(2)}y_i^{(2)}}{f},$$

$$\frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \omega} = x_i^{(2)}\nu + 2y_i^{(2)}\omega + 2\frac{x_i^{(2)}y_i^{(2)}}{f}\tau + \left(f + \frac{(y_i^{(2)})^2}{f}\right).$$

$$\frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \tau} = \left(\frac{x_i^{(2)} - y_i^{(2)}}{f}\right)\nu + 2\frac{x_i^{(2)}y_i^{(2)}}{f}\omega + y_i^{(2)}\tau - x_i^{(2)}. \quad (4)$$

Составим уравнение поправок, соответствующее линеаризованному уравнению (3). Пусть $\tilde{\nu}, \tilde{\omega}, \tilde{\tau}$ – приближённые значения углов тангажа, крена и рыскания БЛА; $\Delta p_i^0, \Delta q_i^0$ – точные значение разниц продольного и поперечного параллаксов точки i в зоне перекрытия снимков P_1, P_2, а $\Delta\tilde{p}_i, \Delta\tilde{q}_i$ – их приближённые значения.

Тогда вектор

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_i = \begin{pmatrix} \Delta p_i^0 - \Delta\tilde{p}_i \\ \Delta q_i^0 - \Delta\tilde{q}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_i{}^p \\ \varepsilon_i{}^q \end{pmatrix} \quad (5)$$

будет вектором свободных членов, а в качестве вектора поправок в значения $\Delta p_i^0, \Delta q_i^0$ примем вектор

$$\bar{\boldsymbol{\vartheta}}_i = \begin{pmatrix} \vartheta_i{}^p \\ \vartheta_i{}^q \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Учитывая изложенное, уравнение поправок для каждой точки i, соответствующее линеаризованному уравнению (3), будет иметь следующий вид:

$$\boldsymbol{M_i}\Delta\bar{\boldsymbol{U}}_i = \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_i + \bar{\boldsymbol{\vartheta}}_i, \quad (7)$$

где $\boldsymbol{M_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \nu} & \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \omega} & \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \tau} \\ \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \nu} & \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \omega} & \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \tau} \end{bmatrix}$ – матрица частных производных;

$\Delta\bar{\boldsymbol{U}}_i = \begin{pmatrix} \Delta\nu \\ \Delta\omega \\ \Delta\tau \end{pmatrix}$ – вектор поправок к приближённым значениям $\tilde{\nu}, \tilde{\omega}, \tilde{\tau}$.

В уравнении (7) компоненты $\Delta\tilde{p}_i, \Delta\tilde{q}_i$ вектора $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_i$ и элементы матрицы $\boldsymbol{M_i}$ вычисляются соответственно по формулам (2) и (4) при приближённых значениях углов $\tilde{\nu}, \tilde{\omega}, \tilde{\tau}$. При этом размерность уравнения поправок (7) определяется размерностью свободного члена $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_i$, а именно в мм. Поэтому углы тангажа, крена и рыскания БЛА в уравнениях (2) и поправки к ним в (7) должны быть в радианах, а плоские координаты $x_i^{(2)}, y_i^{(2)}$ i-й точки и фокусное расстояние f цифровой камеры – в миллиметрах.

Для каждой точки i с плоскими координатами $x_i^{(2)}, y_i^{(2)}$, находящейся в

зоне перекрытия изображений P_1 и P_2, можно составить два уравнения поправок. Тогда структура общей системы уравнений поправок в векторно-матричной форме для всех включенных в обработку точек с порядковыми номерами $i = \overline{1, I}$ будет иметь следующий вид:

$$\boldsymbol{M}_{[2I,3]}\Delta\overline{\boldsymbol{U}}_{<3,1>} = \overline{\boldsymbol{\varepsilon}}_{<2I,1>} + \overline{\boldsymbol{\vartheta}}_{<2I,1>}, \quad (8)$$

где $\boldsymbol{M}_{[2I,3]} = \begin{vmatrix} \frac{\partial(\Delta p_1)}{\partial\nu} & \frac{\partial(\Delta p_1)}{\partial\omega} & \frac{\partial(\Delta p_1)}{\partial\tau} \\ \frac{\partial(\Delta q_1)}{\partial\nu} & \frac{\partial(\Delta q_1)}{\partial\omega} & \frac{\partial(\Delta q_1)}{\partial\tau} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial(\Delta p_I)}{\partial\nu} & \frac{\partial(\Delta p_I)}{\partial\omega} & \frac{\partial(\Delta p_I)}{\partial\tau} \\ \frac{\partial(\Delta q_I)}{\partial\nu} & \frac{\partial(\Delta q_I)}{\partial\omega} & \frac{\partial(\Delta q_I)}{\partial\tau} \end{vmatrix}$,

$$\Delta\boldsymbol{U}_{<3,1>} = \begin{pmatrix} \delta\nu \\ \delta\omega \\ \delta\tau \end{pmatrix}; \quad \overline{\boldsymbol{\varepsilon}}_{<2I,1>} = \begin{pmatrix} {\varepsilon_1}^p \\ {\varepsilon_1}^q \\ \vdots \\ {\varepsilon_I}^p \\ {\varepsilon_I}^q \end{pmatrix},$$

$$\overline{\boldsymbol{\vartheta}}_{<2I,1>} = \begin{pmatrix} {\vartheta_1}^p \\ {\vartheta_1}^q \\ \vdots \\ {\vartheta_I}^p \\ {\vartheta_I}^q \end{pmatrix}.$$

В соответствие с методом наименьших квадратов для решения задачи уточнения углов тангажа, крена и рыскания БЛА необходимо иметь переопределённую систему уравнений поправок (8), для чего требуется выделить в зоне перекрытия не менее двух точек. При этом итерационный процесс решения системы уравнений (8) производится по формуле

$$\Delta\overline{\boldsymbol{U}}_{<3,1>_{(\xi)}} = \left(\boldsymbol{M}_{[3,2I]}{}^{\mathrm{T}} \cdot \boldsymbol{M}_{[2I,3]}\right)^{-1}_{(\xi)} \cdot \\ \cdot \boldsymbol{M}_{[3,2I]}{}^{\mathrm{T}}{}_{(\xi)}\overline{\boldsymbol{\varepsilon}}_{<2I,1>_{(\xi)}}, \quad (9)$$

где ξ– порядковый номер итерации.

В процессе решения поправки $\Delta\nu, \Delta\omega, \Delta\tau$ находятся до тех пор, пока в какой-либо итерации $(\xi + 1)$ не выполнится условие

$$\Delta\overline{\boldsymbol{U}}_{<3,1>_{(\xi+1)}} - \Delta\overline{\boldsymbol{U}}_{<3,1>_{(\xi)}} \leq \\ \leq (\delta\nu, \delta\omega, \delta\tau)^{\mathrm{T}}_{\text{доп}}, \quad (10)$$

где $(\delta\nu, \delta\omega, \delta\tau)^{\mathrm{T}}_{\text{доп}}$ – заданная априорно точность вычислений.

При этом оценка точности полученных решений производится по формуле

$$\sigma\overline{\boldsymbol{U}}_{<3,1>_{(\xi+1)}} = \\ = \sigma_0\sqrt{diag\left[\left(\boldsymbol{M}_{[3,2I]}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}_{[2I,3]}\right)\right]^{-1}_{(\xi+1)}}. \quad (11)$$

Параметр σ_0 представляет собой ошибку единицы веса измерений и вычисляется следующим образом. Полученные в заключительной итерации $(\xi + 1)$ значения элементов матрицы $\boldsymbol{M}_{[2I,3]_{(\xi+1)}}$, компонент векторов свободных членов $\overline{\boldsymbol{\varepsilon}}_{<2I,1>_{(\xi+1)}}$ и поправок $\Delta\overline{\boldsymbol{U}}_{<3,1>_{(\xi+1)}}$ подставляют в уравнение (8) и находят значения компонент вектора $\overline{\boldsymbol{\vartheta}}_{<2I,1>_{(\xi+1)}}$, после чего σ_0 определяют по формуле

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\overline{\vartheta}_1{}^{p\mathrm{T}}{}_{<2I,1>_{(\xi+1)}}\overline{\vartheta}_1{}^{p}{}_{<2I,1>_{(\xi+1)}}}{2I-3}} = \\ = \sqrt{\frac{({\vartheta_1}^p)^2 + ({\vartheta_1}^q)^2 + \cdots + ({\vartheta_I}^p)^2 + ({\vartheta_I}^q)^2}{2I-3}}. \quad (12)$$

Результаты и их обсуждение

Выражения (2) – (12) описывают процедуры математической обработки результатов инерциальных и фотограмметрических измерений, составляющие основу предлагаемой методики уточне-

ния параметров отклонений БЛА от заданной траектории по изображениям подстилающей поверхности в условиях потери сигналов от навигационных спутников. При этом в штатном режиме полёта БЛА все перекрывающиеся снимки по условиям задачи являются горизонтальными, а в нештатном – один снимок является горизонтальным, а второй – наклонным, т. е. полученным при некоординированных отклонениях БЛА по углам тангажа, крена и рыскания.

Параметры $\Delta p, \Delta q$ представляют собой разницу параллаксов соответственных точек перекрывающихся снимков, полученных в этих режимах полёта БЛА. Из выражений (2) следует, что в штатном режиме горизонтального полёта, т. е. при $\nu = \omega = \tau = 0$, разница параллаксов $\Delta p = \Delta q = 0$.

Поскольку для перекрывающихся горизонтальных снимков, полученных с одной высоты полёта БЛА, справедливы соотношения (1), очевидно, что отличие от нуля разниц параллаксов $\Delta p, \Delta q$ свидетельствует о появлении некоординированных отклонений БЛА.

Для оценки точности предлагаемой методики были проведены исследования на основе экспериментальных данных, представленных ниже (табл. 1).

Таблица 1. Экспериментальные данные

Table 1. Experimental data

Параметры/ Parameters			
Цифровая камера / Digital camera	Съёмка/ Shooting	Снимки / Snapshots	
Матрица ПЗС. Длина: 8 мм. Ширина: 6 мм. Число пикселей: 3648 на 2736. Размер пикселя: $2{,}2 \cdot 10^{-6}$ м. Фокусное расстояние фотокамеры: $f = 2{,}4$ мм	Высота съёмки: $H = 285$ м. Расстояние S_1S_2: $\Delta r_S = 95$ м	Формат горизонтальных снимков: -4 мм $\leq x_1^{(j)} \leq 4$ мм; -3 мм $\leq y_1^{(j)} \leq 3$ мм. Значения параллаксов в штатном режиме горизонтального полёта БЛА: $p_{ш} = 4$ мм; $q_{ш} = 0$. Коэффициент перекрытия горизонтальных снимков в штатном режиме горизонтального полёта: 50%. Контрольные значения углов взаимной ориентации снимков (параметров отклонений БЛА): $\nu = \omega = \tau = 5^{\circ}$	Плоские координаты: 1 точка: $x_1^{(1)} = 2$ мм; $y_1^{(1)} = 1{,}5$ мм; $x_1^{(2)} = -2{,}134$ мм; $y_1^{(2)} = 1{,}51$ мм. 2 точка: $x_2^{(1)} = 2$ мм; $y_2^{(1)} = -1{,}5$ мм; $x_2^{(2)} = -2{,}656$ мм; $y_2^{(2)} = -1{,}712$ мм. Разницы параллаксов: $\Delta p_1 = 0{,}134$ мм; $\Delta p_2 = 0{,}656$ мм; $\Delta q_1 = -0{,}01$ мм; $\Delta q_2 = 0{,}212$ мм

Эти данные были сформированы следующим образом. В качестве характеристик цифровой фотокамеры и съёмки были взяты параметры камеры Nicon P700 [20]. Для оценки точности методики были использованы две точки (1 и 2) в зоне перекрытия перекрывающихся снимков P_1и P_2 (рис. 3). Плоские координаты $x_1^{(1)}, y_1^{(1)}; x_2^{(1)}, y_2^{(1)}$ точек 1 и 2 на снимке P_1 задавались исходя формата зоны перекрытия горизонтальных снимков. Значения плоских координат $x_1^{(2)}, y_1^{(2)}; x_2^{(2)}, y_2^{(2)}$ точек 1 и 2 на наклонном снимке P_2 моделировались путём трансформации по известным в теории фотограмметрии формулам взаимосвязи координат горизонтального и наклонного снимков при заданных контрольных значениях углов $\nu = \omega = \tau = 5^{\circ}$.

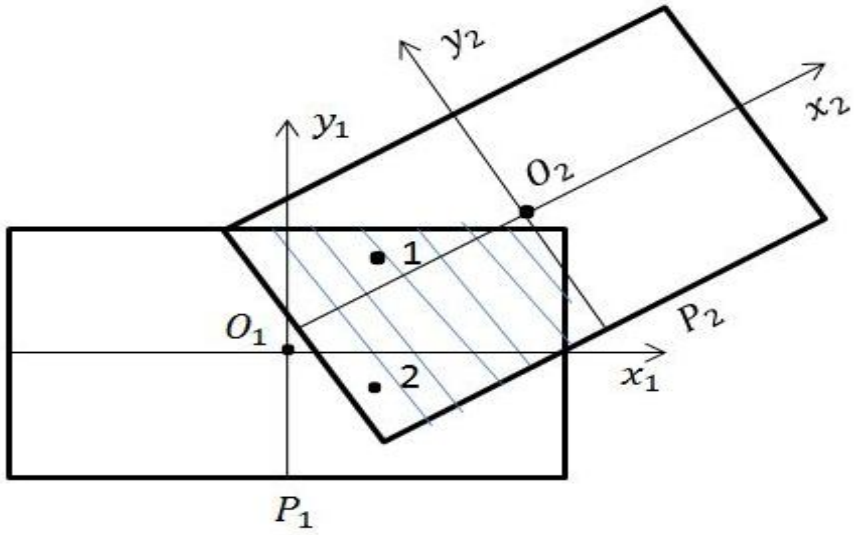


Рис. 3. Горизонтальный и наклонный снимки

Fig. 3. Horizontal and inclined shots

Значения $p_{ш}, q_{ш}$ моделировались в соответствии с формулой (1) исходя из заданного коэффициента перекрытия горизонтальных снимков в штатном режиме полёта БЛА (рис. 4).

Разницы значений продольных $\Delta p_1, \Delta p_2$ и поперечных $\Delta q_1, \Delta q_2$ параллаксов изображений P_1, P_2, и горизонтальных изображений P_j, P_{j+1}, полученных в штатном режиме горизонтального полёта, моделировались по следующим формулам:

$$\Delta p_i = x_i^{(1)} - x_i^{(2)} - p_{ш},$$

$$\Delta q_i = y_i^{(1)} - y_i^{(2)} - q_{ш}.$$

Полученные результаты экспериментальных исследований предлагаемой методики при использовании двух точек в зоне перекрытия снимков P_1, P_2 и начального приближения параметров отклонений БЛА $\tilde{\nu} = \tilde{\omega} = \tilde{\tau} = 3^{\circ}$приведены ниже (табл. 2).

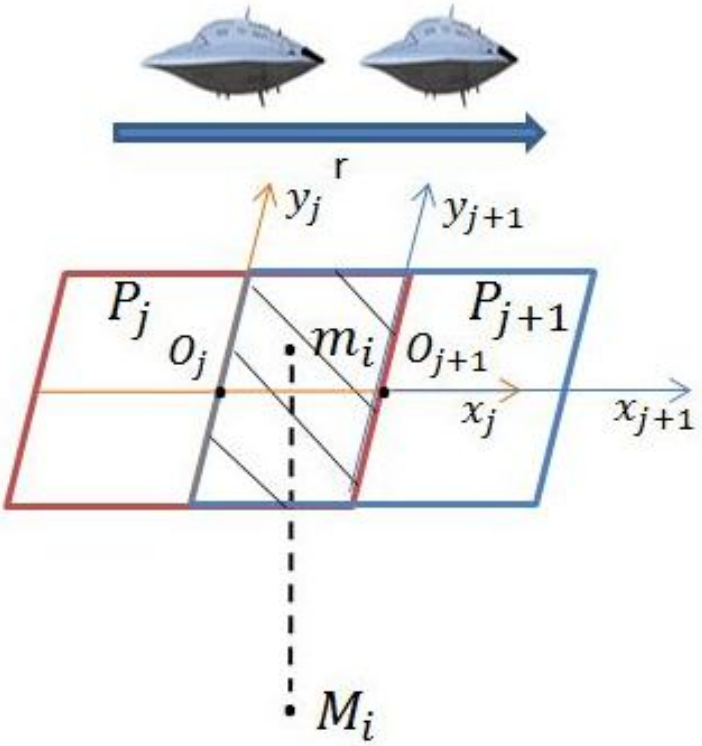


Рис. 4. Горизонтальные снимки

Fig. 4. Horizontal shots

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований

Table 2. Results of experimental researches

Число итераций / Number of iterations	Поправки к приближённым значениям параметров угловых отклонений БЛА, град / Corrections to approximated values of UAV angular deviation parameters, deg			Уточнённые значения параметров угловых отклонений БЛА, град / Refined values of the parameters of the angular deviations of the UAV, deg			Абсолютная ошибка определения параметров угловых отклонений БЛА, град / Absolute error in determining the parameters of UAV angular deviations, deg		
	$\Delta\nu$	$\Delta\omega$	$\Delta\tau$	ν	ω	τ	$\Delta_A\nu$	$\Delta_A\omega$	$\Delta_A\tau$
1	2,06	1,99	2,07	5,06	4,99	5,07	0,06	0,01	0,07

Сравнительный анализ полученных результатов и известных оценок точности навигации мини-БЛА [1] позволяет отметить следующее (табл. 3).

Таблица 3. Уровень ошибок навигации при прямолинейном горизонтальном полёте мини-БЛА

Table 3. The level of navigation errors during straight-line horizontal flight of a mini UAV

Погрешности навигации с использованием сигналов от навигационных спутников / Navigation errors using signals from navigation satellites		Погрешности инерциальной навигации через 5 минут после пропадания сигналов от навигационных спутников / Errors of inertial navigation 5 minutes after the loss of signals from navigation satellites
Углы крена и тангажа, град	0,1°	0,4°
Угол рыскания, град	0,2°	3,0°

Разработанная методика в условиях отсутствия ошибок нахождения и расчёта плоских координат соответственных точек перекрывающихся изображений подстилающей поверхности обеспечивает уровень точности, соизмеримый с методами спутниковой навигации. При этом для получения высокой точности требуется минимально необходимое число точек, а именно две, всего лишь одна итерация.

Выводы

При горизонтальном полёте беспилотных летательных аппаратов по заданной траектории продольные параллаксы точек перекрывающихся снимков видеопотока не изменяются, а поперечные – равны нулю. Отличие от нуля значений разниц параллаксов смежных пар снимков является критерием автоматического обнаружения некоординированных отклонений маршрута полёта от заданной траектории.

Разработанная методика основана на решении по методу наименьших квадратов системы нелинейных уравнений, описывающих функциональную связь изменений параллаксов смежных пар изображений подстилающей поверхности и параметров отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории. Это позволяет её использовать в задачах уточнения параметров отклонений, измеряемых средствами инерциальной навигации в условиях потери сигналов от навигационных спутников.

Разработанная методика в условиях отсутствия ошибок нахождения и расчёта плоских координат соответственных точек смежных пар перекрывающихся изображений подстилающей поверхности обеспечивает уровень точности, соизмеримый с методами спутниковой навигации. При этом в отличие от известных подходов к организации обработки изображений подстилающей поверхности требуется всего две точки, а требуемая точность достигается уже после первой итерации.

Список литературы

1. Салычев О. С. Автопилот БПЛА с инерциальной интегрированной системой – основа безопасной эксплуатации беспилотныхкомплексов. URL: http://www.teknol.ru/trash/ uav_autopilot_salychev_2602182965.pdf (дата обращения: 14.05.2022).

2. Пронькин А. Н., Кузнецов И. М., Веремеенко К. К. Интегрированная навигационная система БПЛА: структура и исследование характеристик // Труды МАИ. 2010. № 41. С. 14.

3. Hosseini K., Ebadi H., Farnood Ahmadi F. Determining the location of UAVs automatically using aerial or remotely sensed high-resolution images for intelligent navigation of UAVs at the time of disconnection with GPS // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2020. N 48(12). P. 1675-1689. htpps://doi.org/10.1007/s12524-020-01187-4.

4. Andronov V. G., Emelyanov S. G. Autonomous navigation and attitude control of spacecrafts on near-earth circular orbits // Journal of applied engineering science. 2018. Vol. 16, N 1. P. 107-110.

5. Kikutis R., Stankūnas J., Rudinskas D. Autonomous unmanned aerial vehicle flight accuracy evaluation for three different path-tracking algorithms // Transport. 2019. N 34(6). P. 652-661.

6. Kinematics and plane decomposition algorithm for non linear path planning navigation and tracking of unmanned aerial vehicles / L. Arulmurugan, S. Raghavendra Prabhu, M. Ilangkumaran, V. Suresh, R. Saravanakumar, R., M. Raghunath // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. P. 012019.

7. Review of multi-modal image matching assisted inertial navigation positioning technology for unmanned aerial vehicle / S. Luo, H. Liu, M. Hu, J. Dong // Journal of National University of Defense Technology. 2020. Vol. 42, N 6. P. 1-10.

8. Малоразмерные беспилотные летательные аппараты: задачи обнаружения и пути их решения / И. И. Олейник, А. А. Черноморец, В. Г. Андронов [и др.] / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2021. 171 с.

9. Определение навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения и инерциальных измерений / Д. А. Антонов, М. В. Жарков, И. М. Кузнецов, Е. М. Лунев, А. Н. Пронькин // Труды МАИ. 2016. Вып. 91. С. 1-26.

Автономное определение элементов внешнего ориентирования космических снимков / В. Г. Андронов, С. Г. Емельянов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2016. № 2(19). С. 77-87.

10. Веремеенко К. К., Кошелев Б. В., Соловьев Ю. А. Анализ состояния разработок интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем // Новости навигации. 2010. № 4. С. 32-41.

11. Андронов В. Г., Емельянов С. Г. Метод автономной навигации космических аппаратов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 2(65). С. 65-73.

12. Андронов В. Г., Емельянов С. Г. Астронавигация космических аппаратов на круговых околоземных орбитах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 3(66). С. 34-44.

13. Интегрированная система ориентации и навигации БПЛА / К. К. Веремеенко, Д. А. Антонов, М. В. Жарков [и др.] // Новости навигации. 2011. № 4. С. 22-28.

14. Алгоритмы вычисления положения и ориентации БПЛА / А. А. Ардентов, И. Ю. Бесчастный, А. П. Маштаков [и др.] // Программные системы: теория и приложения. 2012. Т. 3, № 3(12). С. 23-38.

15. Андронов В. Г. Технология априорной оценки качества сканерных изображений // Известия Юго-Западного государственного университета. 2014. № 3(54). С. 8-12.

16. Андронов В. Г., Князев А. А., Чуев А. А. Модель параметров отклонений маршрута полёта беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. № 4(25). С. 145-161.

17. Андронов В. Г. Априорная оценка качества космической оптико-электронной съёмки // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2014. № 1. С. 36-40.

18. Гермак О. В. Определение элементов взаимного ориентирования снимков // Интернет-журнал «Науковедение». 2012. № 4. С. 1-5.

19. Раков Д. Н., Никитин В. Н. Выбор цифрового неметрического фотоаппарата для беспилотного аэрофотосъёмочного комплекса // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. № 7. С. 27-36.

References

1. Salychev O. S. Avtopilot BPLA s inertsial'noi integrirovannoi sistemoi – osnova bezopasnoi ekspluatatsii bespilotnykhkompleksov [UAV autopilot with an Inertial Integrated System is the basis for the safe operation of unmanned complexes]. Available at: http://www.teknol.ru/trash/ uav_autopilot_salychev_2602182965.pdf. (accessed 14.05.2021)

2. Pronkin A. N., Kuznetsov I. M., Veremeenko K. K. Integrirovannaya navigatsionnaya sistema BPLA: struktura i issledovanie kharakteristik [Integrated UAV navigation system: structure and research of characteristics]. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*, 2010, no. 41, pp. 14.

3. Hosseini K., Ebadi H., Farnood Ahmadi F. Determining the location of UAVs automatically using aerial or remotely sensed high-resolution images for intelligent navigation

of UAVs at the time of disconnection with GPS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2020, no. 48(12), pp. 1675-1689. htpps://doi.org/10.1007/s12524-020-01187-4

4. Andronov V. G., Emelyanov S. G. Autonomous navigation and attitude control of spacecrafts on near-earth circular orbits. *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 107-110.

5. Kikutis R., Stankūnas J., Rudinskas D. Autonomous unmanned aerial vehicle flight accuracy evaluation for three different path-tracking algorithms. *Transpor,* 2019, no. 34(6), pp. 652-661.

6. Arulmurugan L., Raghavendra Prabhu S., Ilangkumaran M., Suresh V., Saravanakumar R., Raghunath M. R. Kinematics and plane decomposition algorithm for non linear path planning navigation and tracking of unmanned aerial vehicles. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, p. 012019.

7. Luo S., Liu H., Hu M., Dong J. Review of multi-modal image matching assisted inertial navigation positioning technology for unmanned aerial vehicle. *Journal of National University of Defense Technology*, 2020, vol. 42, no. 6, pp. 1-10.

8. Oleinik I. I., Chernomorets A. A., Andronov V. G., eds. Malorazmernye bespilotnye letatel'nye apparaty: zadachi obnaruzheniya i puti ikh resheniya [Small–sized unmanned aerial vehicles: detection tasks and ways to solve them]. Kursk, Southwest State University Publ., 2021. 171 p.

9. Antonov D. A., Zharkov M. V., Kuznetsov I. M., Lunev E. M., Pronkin A. N. Opredelenie navigatsionnykh parametrov bespilotnogo letatel'nogo apparata na baze fotoizobrazheniya i inertsial'nykh izmerenii [Determination of navigation parameters of an unmanned aerial vehicle based on photographic images and inertial measurements]. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*, 2016, is. 91, pp. 1-26.

10. Andronov V. G., Emelyanov S. G. Avtonomnoe opredelenie elementov vneshnego orientirovaniya kosmicheskikh snimkov [Autonomous determination of elements of external orientation of satellite images]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vy`chislitel`naya texnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2016, no. 2(19), pp. 77-87.

11. Veremeenko K. K., Koshelev B. V., Soloviev Yu. A. Analiz sostoyaniya razrabotok integrirovannykh inertsial'no-sputnikovykh navigatsionnykh sistem [Analysis of the state of development of integrated inertial-satellite navigation systems]. *Novosti navigatsii = Navigation News*, 2010, no. 4, pp. 32-41.

12. Andronov V. G., Emelyanov S. G. Metod avtonomnoi navigatsii kosmicheskikh apparatov [Method of autonomous navigation of spacecraft]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo*

gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University, 2016, no. 2(65), pp. 65-73.

13. Andronov V. G., Emelyanov S. G. Astronavigatsiya kosmicheskikh apparatov na krugovykh okolozemnykh orbitakh [Astronavigation of spacecraft in circular near-Earth orbits]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no. 3(66), pp. 34-44.

14. Veremeenko K. K., Antonov D. A., Zharkov M. V., eds. Integrirovannaya sistema orientatsii i navigatsii BPLA [Integrated UAV orientation and navigation system]. *Novosti navigatsii = Navigation News*, 2011, no. 4, pp. 22–28.

15. Ardentov A. A., Beschastny I. Y., Mashtakov A. P., eds. Algoritmy vychisleniya polozheniya i orientatsii BPLA [Algorithms for calculating the position and orientation of the UAV]. *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya = Software Systems: Theory and Applications*, 2012, vol. 3, no. 3(12), pp. 23-38.

16. Andronov V. G. Tekhnologiya apriornoi otsenki kachestva skanernykh izobrazhenii [Technology of a priori assessment of the quality of space optical-electronic survey]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2014, no. 3(54), pp. 8-12.

17. Andronov V. G., Knyazev A. A., Chuev A. A. Model' parametrov otklonenii marshruta poleta bespilotnykh letatel'nykh apparatov ot zadannoi traektorii [Model of parameters of deviations of the flight route of unmanned aerial vehicles from a given trajectory]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2021, no. 4(25), pp. 145-161.

18. Andronov V. G. Apriornaya otsenka kachestva kosmicheskoi optiko-elektronnoi s"emki [A priori assessment of the quality of space optical-electronic survey]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vy`chislitel`naya texnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering,* 2014, no. 1, pp. 36-40.

19. Germak O. V. Opredelenie elementov vzaimnogo orientirovaniya snimkov [Determination of elements of mutual orientation of images]. *Internet-zhurnal "Naukovedenie"= Online Journal "Science Studies"*, 2012, no. 4, pp. 1-5.

20. Rakov D. N., Nikitin V. N. Vybor tsifrovogo nemetricheskogo fotoapparata dlya bespilotnogo aerofotos"emochnogo kompleksa [The choice of a digital non-metric camera for an unmanned aerial photography complex]. *Interekspo Geo-Sibir' = Interexpo Geo-Siberia*, 2012, no. 7, pp. 27-36.

Информация об авторах / Information about the Authors

Андронов Владимир Германович, доктор технических наук, заведующий кафедрой космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: vladia58@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2578-0026

Чуев Андрей Алексеевич, аспирант кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: kpiss-swsu@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2980-0533

Юдин Илья Сергеевич, студент кафедры конституционного права, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: angry_bender @ mail.ru

Дубровский Никита Сергеевич, студент кафедры конституционного права, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: keiiiyctuk@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1261-1928

Vladimir G. Andronov, Dr. of Sci. (Engineering), Head of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: vladia58@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2578-0026

Andrey A. Chuev, Post-Graduate Student of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: kpiss-swsu@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2980-0533

Ilya S. Yudin, Student of the Department of Constitutional Law, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: angry_bender @ mail.ru

Nikita S. Dubrovsky, Student of the Department of Constitutional Law, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: keiiiyctuk@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1261-1928

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-80-96

CC BY 4.0

Метод комплексной оценки уровня информативности классификационных признаков в условиях нечеткой структуры данных

Н. А. Кореневский[1] ✉, В. В. Аксенов[1], С. Н. Родионова[1], С. Н. Гонтарев[2], Л. П. Лазурина[3], Р. И. Сафронов[4]

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

[2] Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы 85, г. Белгород 308015, Российская Федерация

[3] Курский государственный медицинский университет
ул. Карла Маркса 3, г. Курск 305041, Российская Федерация

[4] Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова
ул. Карла Маркса 70, г. Курск 305021, Российская Федерация

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Резюме

Целью исследования *является разработка метода комплексной оценки уровня информативности классификационных признаков в условиях неполной и нечеткой структуры данных.*

Методы исследования*. В качестве базового математического аппарата используется методология синтеза гибридных нечетких решающих правил, ориентированная на принятие решений в условиях неполного и нечеткого описания анализируемых данных. В условиях отсутствия обучающих выборок для оценки информативности предлагается использовать экспертное оценивание с использованием мозгового штурма по методу Дельфы и теорию измерения латентных переменных с моделью Г. Раша. При наличии обучающих выборок, включая выборки малого объема, – методы экспертного оценивания, информативную меру Кульбака, дискриминантный анализ, метод группового учета аргументов, метод Вальда и теорию измерения латентных переменных.*

Результаты. *В качестве базовых элементов математических моделей расчета показателей информативности предложено использовать нормировочные функции информативности, учитывающие меры доверия к используемым методам и данным и обладающие свойствами функций принадлежности. Искомые показатели информативности по отдельным признакам и по всему признаковому пространству получают агрегацией нормировочных функций, причем функции агрегации выбираются с учетом особенностей решаемых задач.*

© Кореневский Н. А., Аксенов В. В., Родионова С. Н., Гонтарев С. Н., Лазурина Л. П., Сафронов Р. И., 2022

Заключение. *В ходе проводимых исследований решалась задача разработки метода комплексной оценки уровня информативности классификационных признаков в условиях неполной и нечеткой структуры данных. Было показано, что для количественной оценки информативности каждого из признаков следует использовать несколько методов, описывающих различные свойства исследуемой структуры данных, а интегральный показатель информативности определять путем синтеза нечетких моделей в соответствии с общими рекомендациями методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил. Для повышения точности моделей принятия решений предложен механизм их корректировки путем введения мер доверия к составу информативных признаков и объему обучающей выборки.*

Ключевые слова: *комплексная оценка; информативность; нечеткая структура данных; метод экспертной оценки.*

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

Для цитирования: Метод комплексной оценки уровня информативности классификационных признаков в условиях нечеткой структуры данных / Н. А. Кореневский, В. В. Аксенов, С. Н. Родионова, С. Н. Гонтарев, Л. П. Лазурина, Р. И. Сафронов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 3. С. 80–96. https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-80-96.

Поступила в редакцию 16.06.2022 *Подписана в печать 24.07.2022* *Опубликована 30.09.2022*

***

Method of Complex Assessment of the Level of Information Content of Classification Features in the Conditions of Fuzzy Data Structure

Nikolay A. Korenevskiy[1] ✉, Vitaliy V. Aksenov[1], Sofia N. Rodionova[1], Sergey N. Gontarev[2], Lyudmila P. Lazurina[3], Ruslan I. Safronov[4]

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

[2] Belgorod State National Research University
85 Pobedy Str., Belgorod 308015, Russian Federation

[3] Kursk State Medical University
3 Karl Marx Str., Kursk 305041, Russian Federation

[4] Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov
70 Karl Marx Str., Kursk 305021, Russian Federation

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Abstract

The purpose of research *is to develop a method for a comprehensive assessment of the level of information content of classification features in conditions of incomplete and fuzzy data structure*

Methods. *The methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules is used as a basic mathematical apparatus, focused on decision-making in conditions of incomplete and fuzzy description of the analyzed data. In the absence of training samples, it is proposed to use expert evaluation using brainstorming using the Delphi method and the theory of measuring latent variables with the G. Rush model to assess informativeness. In the presence of training samples,*

including small-volume samples - methods of expert evaluation, the informative Kullback measure, discriminant analysis, the method of group accounting of arguments, the Wald method, and the theory of measurement of latent variables.

Results. *As the basic elements of mathematical models for calculating indicators of informativeness, it is proposed to use normalization functions of informativeness that take into account measures of confidence in the methods and data used and have the properties of membership functions. The desired indicators of informativeness for individual features and for the entire feature space are obtained by aggregation of normalization functions, and aggregation functions are selected taking into account the specifics of the tasks being solved.*

Conclusion. *In the course of the conducted research, the task of developing a method for a comprehensive assessment of the level of information content of classification features in conditions of incomplete and fuzzy data structure was solved. It was shown that to quantify the informativeness of each of the features, several methods describing various properties of the data structure under study should be used, and the integral indicator of informativeness should be determined by synthesizing fuzzy models in accordance with the general recommendations of the methodology for synthesizing hybrid fuzzy decision rules. To improve the accuracy of decision-making models, a mechanism for their correction is proposed by introducing confidence measures to the composition of informative features and the volume of the training sample.*

Keywords: *comprehensive assessment; informativeness; fuzzy data structure; expert evaluation method.*

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

For citation: Korenevskiy N. A., Aksenov V. V., Rodionova S. N., Gontarev S. N., Lazurina L. P., Safronov R. I. Method of Complex Assessment of the Level of Information Content of Classification Features in the Conditions of Fuzzy Data Structure. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022; 12(3): 80–86. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-80-86.

Received 16.06.2022 *Accepted 24.07.2022* *Published 30.09.2022*

***

Введение

В данной работе задача выбора состава информативных признаков рассматривается как составная и важная часть более общей задачи – распознавания образов (РО), основная цель которой состоит в отнесении объектов исследования к одному из интересующих пользователя классу состояний [1; 2; 3; 4; 5]. В общем виде для решения задачи распознавания необходимо решить две проблемы: выбрать состав информативных признаков с возможным определением количественного вклада каждого из них в отнесении объекта к одному из исследуемых классов состояний и установить вид решающего правила, осуществляющего это отнесение [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7].

Часто при начальном подходе к решению задач РО на первом этапе выбирают все доступные для анализа признаки, описывающие объект исследования. Это, как правило, приводит к использованию десятков, а иногда и сотен признаков, что чаще всего требует трудоемких и дорогостоящих работ. С математической точки зрения определенные сложности возникают в связи с тем, что значительное число задач решается с использованием разнотипных данных часть, из которых представляют собой

количественные признаки, а часть – качественные (номинальные и порядковые шкалы) [4; 5].

Существует множество методов оценки информативных признаков, включая варианты, когда объекты исследования описываются разнотипными (разнородными) данными. Например, в работе [5] для выбора информативных признаков из разнородного их пространства описываются и исследуются на эффективность методы на основе: дискретного поиска в обучающей выборке информативной зоны; кластеризации; предположения о нормальности распределений объектов в кластерах; теоретико-информационного понятия энтропии; на непараметрических оценок плотности. В работе [4] описываются популярные в медицинских исследованиях методы Кульбака, Шеннона и накопленных частот и исследуется их эффективность на решении задачи отбора информативных признаков для синтеза модели оценки тяжести заболевания бронхиальной астмой. В работе [5], делая обобщение по различным методам оценки информативности признаков, автор указывает на то, что за оценку информативности признака в распознавании образов принято считать отношение качества распознавания контрольной выборки в полном пространстве признаков к качеству распознавания, проводимого без учета оцениваемого признака (метод скользящего контроля). Если известен вид функции распределения, информативность признаков может оцениваться через средние квадратичные отклонения.

Если перед исследователем стоит задача из множества методов оценки информативности выбрать один наиболее эффективный, то в работе [5] этот выбор предлагается осуществлять пропорционально эффективности соответствующего метода на контрольной выборке.

Анализ перечисленных и других методов выбора состава информативных признаков показывает, что подавляющее большинство из них для своей надежной работы требует наличия значительного объема репрезентативных выборок.

При этом в медицинской практике встречается достаточно большое количество практически важных задач, для решения которых на данном этапе развития медицинской науки практически невозможно подготовить репрезентативные обучающие выборки. К таким задачам относятся прежде всего задачи прогнозирования и диагностики ранних стадий заболеваний, некоторые задачи оценки стадий заболеваний и др. Это связано с тем, что современная медицинская наука не знает четко установленных границ между здоровьем и предболезнью, между предболезнью и болезнью и т. д.

С учетом сказанного ***целью работы*** является разработка метода комплексной оценки уровня информативности

классификационных признаков в условиях неполной и нечеткой структуры данных.

Материалы и методы

В основу решаемых в работе задач положена методология синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), ориентированная на принятие решений и, в частности, распознавания образов в условиях неполного и нечеткого описания анализируемых данных при отсутствии или недостатке требуемого для надежного решения статистического материала [8; 9; 10; 11; 12]. Эффективность использования этой методологии при решении плохо формализуемых задач была проверена на большом количестве примеров в области медицины, экологии, психологии и эргономики [8; 9; 10; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22].

В рамках МСГНРП вопросы выбора состава информативных признаков в условиях неопределенности частично рассматриваются при описании процедур разведочного анализа[1]. В данной работе на основе анализа процедур разведочного анализа, описанного в работах [8; 15], предлагается метод комплексной оценки уровня информативности классификационных признаков в условиях неполной и нечеткой структуры данных, являющийся обобщением опыта накопленного на кафедре биомедицинской инженерии ЮЗГУ.

При решении задач синтеза решающих правил при использовании нечеткой парадигмы возможны варианты: полное отсутствие обучающих и контрольных выборок; отсутствие обучающих выборок на момент синтеза решающих правил и формирования контрольных выборок (неполных или репрезентативных) в процессе практического применения решающих правил; наличие обучающих выборок малого (недостаточного для применения надежных статистических критериев) объема на момент синтеза решающих правил и формирования контрольных выборок (неполных или репрезентативных) в процессе практического применения решающих правил.

В первом и втором случаях в рамках МСГНРП предлагается использование двух методов: метод прямого экспертного оценивания по заданным шкалам с использованием мозгового штурма по методу Дельфы и теория измерения латентных переменных с моделью Г. Раша, практическая реализация которой обеспечивается интерактивным пакетом RUMM 2020, а подготовку данных осуществляют эксперты по специальной методике [8; 15].

[1] Шуткин А. Н. Методология синтеза гибридных классификаторов для прогнозирования состояния здоровья и профессиональной пригодности при работе в экстремальных условиях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Курск, 2018. 44 с.

При наличии обучающих выборок малого объема, не позволяющего делать статистически значимые выводы, можно допустить использование большинства из практически используемых методов оценки информативности. При этом уровень доверия к тому, насколько корректно с их помощью оценивается искомая информативность, естественно, должен быть снижен как с учетом информационных «возможностей» самого метода, так и с учетом «недостающего» объема обучающей выборки. Для оценки уровня доверия к принимаемым решениям в нечеткой логике вводится нечеткий показатель меры доверия (МД), а для учета возможного недоверия – показатель меры недоверия (МНД) [8; 15]. Мера доверия МДм или недоверия МНДм к методу исследования может быть определена прямым экспертным оцениванием по методу Дельфы (ПЭО) и с использованием теории измерения латентных переменных с моделью Г. Раша (ТИЛП). Эти две меры связаны простым аналитическим выражением:

$$МДм = 1 – МНДм.$$

При этом следует иметь в виду, что эксперты в медицинской предметной области не являются глубокими специалистами в области математических методов оценки информативности, поэтому для расчета величин МНДм с использованием ПЭО следует создавать специально подготовленную экспертную группу, а при наличии технических возможностей – использовать ТИЛП.

Меру недоверия к обучающей выборке удобно определять с использованием рекомендаций, описанных в работах [8; 15].

Результаты и их обсуждение

В ходе разработки и исследования эффективности МСГНРП для различного типа задач с неполным и нечетким описанием структуры данных было показано, что для оценки информативности исходных признаков в зависимости от особенностей решаемых задач целесообразно использовать методы экспертного оценивания, информативную меру Кульбака, дискриминантный анализ (по величине весовых коэффициентов), метод группового учета аргументов (МГУА) (по величинам показателей степени полиномов Колмогорова-Габора), метод Вальда (по величине диагностического коэффициента), ТИЛП. При этом следует иметь в виду, что каждый из перечисленных методов по разному характеризует понятие информативности. Методы экспертной оценки выражают субъективное мнение специально подобранной группы людей о предмете исследования. Информативная мера Кульбака и диагностический коэффициент А. Вальда основаны на анализе частостей характерных для исследуемых классов состояний. Весовые коэффициенты линейной дискриминантной функции отражают вклад соответствующих признаков в решение задачи классификации при условии выполнения гипотезы о линейной разделимости классов.

Показатели степени полиномов МГУА отражают роль соответствующих признаков в решении классификационных задач в условиях возможных существенных нелинейностей. При использовании теории измерения латентных переменных с моделью Г. Раша исследуется роль признаков в выполнении гипотезы о связи индикаторных и латентных переменных логистической моделью. Таким образом, если для оценки информативности кандидатов в список информативных признаков использовать сразу несколько оценочных методов, можно получить более полное описание искомого свойства, уменьшая тем самым вероятность исключения признаков, способных увеличить качество будущих правил распознавания образов.

В качестве примера приведем формулу расчета оценки информативности каждого признака, используемую в процедуре А. Вальда:

$$I(x_i) = K \cdot (P(x_i/A) + P(x_i/B)), \qquad (1)$$

где $K = \frac{\text{ДК}(x_i)}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{2}{1+10^{0,1\text{ДК}}}\right)\right)$.

В последнем выражении диагностический коэффициент *ДК* определяется по формуле

$$\text{ДК} = \sum_{i=1}^{n} 10 \lg \frac{P(x_{ik}/\omega_\ell)}{P(x_{ik}/\omega_r)},$$

где ω_ℓ и ω_r – пара альтернативных диагностических классов (диагнозов); x_{ik} – значение *k*-й градации информативного признака x_i, $(i=1,...,n)$, *n* – размерность пространства признаков; $P(x_{ik}/\omega_\ell)$ – частость появления *k*-й градации *i*-го признака в классе ω_ℓ; $P(x_{ik}/\omega_r)$ – в классе ω_r.

Преимуществами этой процедуры являются простота вычислений, отсутствие определенных требований к распределению величин и возможность постановки диагноза с заранее установленным уровнем надежности даже при отсутствии некоторой части измерений.

При использовании ТИЛП исследование роли индикаторных переменных в измерении латентных осуществляется с помощью стандартного пакета RUMM 2020. Используя значения индикаторных переменных, переведенных в логиты, пакет RUMM 2020 строит теоретические кривые модели Г. Раша, которые с применением критерия Хи-квадрат сопоставляются с усредненными реальными данными. Результат сопоставления определяется как переменная ChiSg Prob. Если эта переменная больше некоторого порога $\chi^2_{\text{крипич}} Prob \geq 0,05$, то считается, что индикаторная переменная корректно описывает исследуемую латентную переменную. В противном случае индикаторная переменная исключается из списка информативных признаков. Вторым критерием исключения индикаторных переменных из списка информативных признаков является условие того, что средняя значимость индикаторной переменной не должна отличаться от среднего уровня интегрального показателя более чем на 0,5 логит.

Кроме этого, для анализа информативности удобно использовать показатели уровней значимости (веса) индикаторных переменных, измеряемые в логитах (*Location*). В общем виде анализ информативности индикаторных переменных с помощью пакета RUMM 2020 является процедурой итерационной. Использование этих и других методов оценки информативности в условиях неопределенности подробнее описаны в работах [8; 10; 15].

При синтезе моделей, определяющих обобщенный (интегральный) показатель информативности по каждому признаку, следует иметь в виду, что меры информативности, получаемые различными методами, могут иметь несопоставимые шкалы, что затрудняет их использование в единой модели оценивающей интегральную информативность. Для достижения сопоставимости по различным показателям в распознавании образов широко используются различные способы нормирования. Эти же способы могут быть использованы и для решения поставленных в работе задач. Тогда в общем виде интегральная оценка меры информативности IOI_i признака с номером i определяется выражением

$$IOI_i = Fag_i\,(IN_{ij}), \qquad (2)$$

где IN_{ij} – нормированное значение признака с номером i, определенное с помощью метода с идентификатором j; Fag_i – соответствующая функция агрегации. Учет уровня доверия к используемым методам оценки информативности можно осуществить, введя в выражение (2) соответствующие весовые коэффициенты α_i, тогда

$$IOI_i = Fag_i\,(\alpha_i, IN_{ij}). \qquad (3)$$

В рамках МСГНРП для нормирования переменных рекомендуют оценивать возможность и целесообразность использования нормировочных функций со свойствами, аналогичными свойствам функциям принадлежности, что позволяет для оценки интегральных характеристик использовать аппарат нечеткой логики. Для решения рассматриваемой задачи введем нормировочную функцию информативности $f(I_{ij})$ с областью значений [0,1] с базовой переменной по исходной шкале информативности I_{ij}. Нулевому значению функции соответствуют значения I_{ij}, ниже которых от признака x_i следует отказаться как от неинформативного. Единичному значению функции соответствуют значения I_{ij}, выше которых признак x_i должен быть обязательно включен в состав информативных признаков. В таком варианте нормировочная функция определяется выражением

$$IN_{ij} = f(I_{ij}). \qquad (4)$$

На рисунке приведены варианты графиков нормировочных функций информативности.

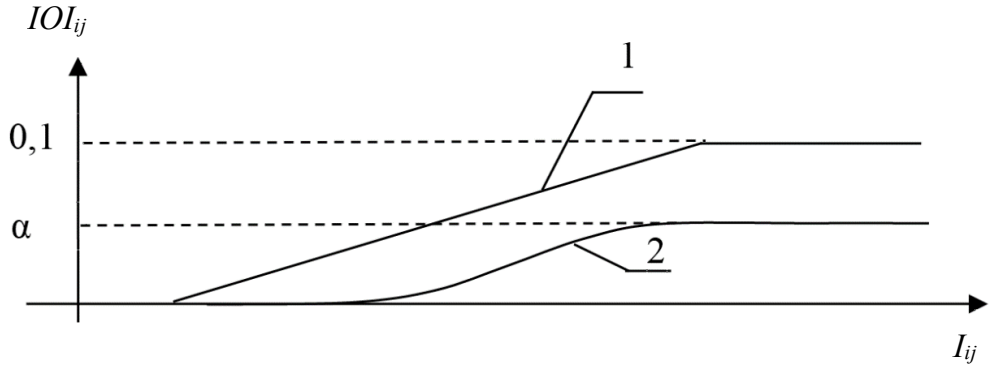


Рис. Варианты графиков нормировочных функций информативности

Fig. Variants of graphs of normalization functions of informativeness

Кривая 1 соответствует варианту, в котором эксперты полностью доверяют используемому методу, а кривая 2 построена с учетом мнения экспертов о том, насколько они доверяют методу с идентификатором j. Это доверие ограничивается числом а на оси IN_{ij}.

При введении нормировочных функций $f(I_{ij})$ функции агрегации в выражении (3) определяются экспертами исходя из свойств этих функций.

Если эксперты считают, что добавление каждого нового метода информативности увеличивает оценку информативности признака x_i, то расчет IOI_i осуществляется по формуле

$$IOI_i(j+1) = IOI_i(j) + f(I_{ij})[1 - IOI_i(j)]. \quad (5)$$

Если эксперты отдают предпочтение методу с максимальной информативностью, стремясь не пропустить ни одного признака, который может способствовать увеличению качества принимаемых решений, используют агрегатор типа

$$IOI_i = \max_j[f(I_{ij})]. \quad (6)$$

Если эксперты отдают предпочтение сокращению пространства информативных признаков (даже в ущерб качеству принимаемых решений), используют агрегатор типа

$$IOI_i = \min_j[f(I_{ij})]. \quad (7)$$

В логике МСГНРП меру доверия к рассчитанной информативности по признаку x_i можно «связать» с объемом обучающей выборки V, введя функцию меры доверия к выборке МДВ(V) с областью значений [0,1] с базовой переменной по объему выборки. Нулевому значению функции соответствуют отсутствие выборки или полное недоверие к ней. В этом случае дальнейшее решение осуществляется по алгоритму работы без выборки. Единичному значению функции соответствует наличие репрезентативной выборки или мнение экспертов о том, что после некоторых значений V эту меру можно не учитывать. С учетом МДВ(V) значение IOI_i можно уточнить, введя соответствующую меру недоверия:

$$\text{МНДВ}(V) = 1 - \text{МДВ}(V).$$

Уточненная величина информативности определяется выражением

$$II_i = \begin{cases} 0, \text{ если } II_i \leq \text{МНДВ}(V), \\ IOI_i - \text{МНДВ}(V), \\ \text{если } II_i > \text{МНДВ}\ (V). \end{cases} \quad (8)$$

После определения информативности по каждому из анализируемых признаков эксперты формулируют условие формирования пространства информативных признаков. Наиболее простым и распространенным способом является выбор порога информативности с отбрасыванием признаков с информативностью ниже пороговой.

Одним из важнейших параметров решающих правил, синтезируемых с использованием МСГНРП, является уверенность в принимаемых решениях. В работах [8; 15] рекомендуется показатели уверенности корректировать с учетом собираемой обучающей выборки и состава информативных признаков. Для этого вводятся понятия меры доверия к обучающим способностям выборки (МДВ) и меры доверия к признаковому пространству (МДП).

При этом полное доверие к обучающей выборке и составу признаков означает, что существует потенциальная возможность синтеза классификационных решающих правил, которые никогда «не ошибаются».

Для обучающей выборки рекомендуется определять меры доверия к репрезентативности выборки МДР, меры доверия к объему выборки МДО, меры доверия экспертов к выборке МДЭВ, которые агрегируются в правила определения МДВ.

С учетом моделей (3) – (8) мера доверия МДП определяется выражениями:

$$\text{МДП} = F_{IOI_i}(IOI_i),$$

или

$$\text{МДП} = F_{II_i}(II_i),$$

где F_{IOI_i} и F_{II_i} – соответствующие функции агрегации.

Функции агрегации определяются в соответствии с общими рекомендациями МСГНРП.

Учитывая, что составляющие МДВ и МДП дополняют друг друга в оценке классификационных возможностей используемых медицинских данных, общую меру классификационного доверия к данным МДД в работах предлагается определять выражением

$$\text{МДД} = \text{МДВ} + \text{МДП} - \text{МДП}\cdot\text{МДВ}. \quad (9)$$

Мера доверия МДД может быть использована как для обучающих (МДД_0), так и для контрольных ($\text{МДД}_к$) выборок.

Полученные значения мер МДД позволяют уточнять степень доверия к синтезируемым решающим правилам (например, как в модели 8), т. к. учитывают не только работу самих классификационных правил, но и особенности тех данных, которые привлекаются для процессов обучения и контроля работы автоматизированной системы классификации.

Выводы

В ходе проводимых исследований решалась задача разработки метода комплексной оценки уровня информативности классификационных признаков в условиях неполной и нечеткой структуры данных.

Было показано, что для количественной оценки информативности каждого из признаков следует использовать несколько методов, описывающих различные свойства исследуемой структуры данных, а интегральный показатель информативности определять путем синтеза нечетких моделей в соответствии с общими рекомендациями методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил. Для повышения точности моделей принятия решений предложен механизм их корректировки путем введения мер доверия к составу информативных признаков и объему обучающей выборки.

Список литературы

1. Дюк В., Эмануэль В. Информационные технологии в медико-биологических исследованиях. СПб.: Питер, 2003. 528 с.

2. Журавлев Ю. И., Гуревич И. Б. Распознавание образов и анализ изображений // Искусственный интеллект: в 3 кн. / под ред. Д. А. Поспелова. М.: Радио и связь, 1990. С. 149–190.

3. Загоруйко Н. Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 1999. 270 с.

4. Выбор информативных признаков для оценки тяжести заболевания / С. В. Капустина, О. В. Кирякова, А. В. Капустина, Л. А. Лапина, А. А. Ступина // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-2. С. 55.

5. Колесникова С. И. Методы анализа информативности разнотипных признаков // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. Обработка информации. 2009. № 1(6). С 69-80.

6. Буняев В. В., Кореневский Н. А. Методы поиска информативных проекционных зон и синтеза нечетких решающих правил для рефлексодиагностики // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2004. Т. 3, № 3. С. 175-178.

7. Воронцов И. М., Шаповалов В. В., Шерстюк Ю. М. Здоровье. Опыт разработки и обоснование применения автоматизированных систем для мониторинга и скринирующей диагностики нарушений здоровья. СПб.: ИПК Коста, 2006. 432 с.

8. Кореневский Н. А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.

9. Гибридные нечеткие модели оценки функционального состояния и состояния здоровья человека-оператора информационно насыщенных систем / Н. А. Кореневский, С. Н. Родионова, И. И. Хрипина, М. А. Мясоедова // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 2. С. 105-109.

10. Метод синтеза нечетких решающих правил на основе моделей системных взаимосвязей для решения задач прогнозирования и диагностики заболеваний / Н. А. Кореневский, М. В. Артеменко, В. Я. Провоторов, Л. А. Новиков // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2014. Т. 13, № 4. С. 881-886.

11. Use of an Interactive Method for Classification in Problems of Medical Diagnosis / N. A. Korenevsky, S. V. Degtyarev, S. P. Seregin, A. V. Novikov // Biomedical Engineering. 2013. Vol. 47, is. 4. P. 169-172.

12. Korenevskiy N. A. Application of Fuzzy Logic for Decision-Making in MedicalExpert Systems // Biomedical Engineering. 2015. Vol. 49. P. 46-49.

13. Нечеткие модели оценки уровня эргономики технических систем и ее влияние на состояние здоровья человека оператора с учетом функциональных резервов / Н. А. Кореневский, С. Н. Родионова, Т. Н. Говорухина, М. А. Мясоедова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7, № 1 (24). С. 39-53.

14. Прогнозирование возникновения и рецидива инсультов головного мозга на основе гибридных нечетких моделей / Н. А. Кореневский, А. В. Быков, Е. В. Цымбал, В. В. Аксенов, Д. С. Родионов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6, № 3 (22). С. 50-72.

15. Оценка и управление состоянием здоровья обучающихся на основе гибридных интеллектуальных технологий: монография / Н. А. Кореневский, А. Н. Шуткин, С. А. Горбатенко, В. И. Серебровский. Старый Оскол: ТНТ, 2016. 472 с.

16. Кореневский Н. А., Тутов Н. Д., Лазурина Л. П. Проектирование медико-экологических информационных систем / Курский государственный технический университет. Курск, 2001. 193 с.

17. Синтез нечетких решающих правил для прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, вызываемых состоянием окружающей среды, с учетом индивидуальных особенностей организма / Н. А. Кореневский, Ю. А. Иванков, Е. А. Яковлева, Н. Н. Савченко // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2007. Т. 6, № 2. С. 395-400.

18. Метод оценки функционального резерва человека-оператора на основе комбинированных правил нечеткого вывода / Н. А. Кореневский, А. Н. Коростелев, Л. В. Стародубцева, В. В. Серебровский // Биотехносфера. 2012. № 1 (19). С. 44-49.

19. Кореневский Н. А., Башир А. С., Горбатенко С. А. Синтез гибридных нечетких правил для прогнозирования, оценки и управления состоянием здоровья в экологически

неблагоприятных регионах // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 4. С. 69-73.

20. Method of ergonomics assessment of technical systems and its influence on operators heath on basis of hybrid fuzzy models / R. T. Al-Kasasbeh, M. S. Alshamasin, N. Korenevskiy, I. Maksim // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. Vol. 590. P. 581-592.

21. Synthesis of fuzzy logic for prediction and medical diagnostics by energy characteristics of acupuncture points / R. Al-Kasasbeh, M. Alshamasin, N. Korenevskiy, A. Kuzmin, F. Ionescou // JAMS Journal of Acupuncture and Meridian Studies. 2011. Vol. 4, N 3. P. 175-182.

22. Fuzzy Model Evaluation of Vehicles Ergonomics and Its Influence on Occupational Diseases / R. T. Al-Kasasbeh, N. A. Korenevskiy, M. S. Alshamasin, S. N. Korenevskya, E. T. Al-Kasasbeh, I. Maksim // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2018. P. 143-154.

References

1. Duke V., Emanue V. Informacionnye tekhnologii v mediko-biologicheskih issledovaniyah [Information technologies in biomedical research]. St. Petersburg, Peter Publ., 2003. 528 p.

2. Zhuravlev Yu. I., Gurevich I. B. Raspoznavanie obrazov i analiz izobrazhenij [Pattern recognition and image analysis]. Iskusstvennyi intellekt [Artificial intelligence]; ed. by D. A. Pospelov. Moscow, Radio and Communications, 1990, pp. 149-190.

3. Zagoruiko N. G. Prikladnye metody analiza dannyh i znanij [Applied methods of data and knowledge analysis]. Novosibirsk, Publishing House of the Institute of Mathematics, 1999. 270 p.

4. Kapustina S. V., Kiryakova O. V., Kapustina A. V., Lapina L. A., Stupina A. A. Vybor informativnyh priznakov dlya ocenki tyazhesti zabolevaniya [The choice of informative signs for assessing the severity of the disease]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, 2015, no. 2-2, pp. 55.

5. Kolesnikova S. I. Metody analiza informativnosti raznotipnyh priznakov [Methods of analyzing the informativeness of different types of signs]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. Obrabotka informacii = Bulletin of Tomsk State University. Management, Computer Engineering and Computer Science. Information Processing,* 2009, no. 1(6), pp. 69-80.

6. Bunyaev V. V., Korenevsky N. A. Metody poiska informativnyh proekcionnyh zon i sinteza nechetkih reshayushchih pravil dlya refleksodiagnostiki [Methods of searching for informative projection zones and synthesis of fuzzy decision rules for reflexology]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems,* 2004, vol. 3, no. 3, pp. 175-178.

7. Vorontsov I. M., Shapovalov V. V., Sherstyuk Yu. M. Zdorov'e. Opyt razrabotki i obosnovanie primeneniya avtomatizirovannyh sistem dlya monitoringa i skriniruyushchej diagnostiki narushenij zdorov'ya [Health. Experience in the development and justification of the use of automated systems for monitoring and screening diagnostics of health disorders]. St. Petersburg, IPK Costa Publ., 2006. 432 p.

8. Korenevsky N. A., Rodionova S. N., Khripina I. I. Metodologiya sinteza gibridnyh nechetkih reshayushchih pravil dlya medicinskih intellektual'nyh sistem podderzhki prinyatiya reshenij [Methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems]. Stary Oskol, TNT Publ., 2019. 472 p.

9. Korenevsky N. A., Rodionova S. N., Khripina I. I., Myasoedova M. A. Gibridnye nechetkie modeli ocenki funkcional'nogo sostoyaniya i sostoyaniya zdorov'ya cheloveka-operatora informacionno nasyshchennyh sistem [Hybrid fuzzy models for assessing the functional state and health of a human operator of information-saturated systems]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems,* 2019, vol. 18, no. 2, pp. 105-109.

10. Korenevsky N. A., Artemenko M. V., Provotorov V. Ya., Novikov L. A. Metod sinteza nechetkih reshayushchih pravil na osnove modelej sistemnyh vzaimosvyazej dlya resheniya zadach prognozirovaniya i diagnostiki zabolevanij [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, vol. 13, no. 4, pp. 881-886.

11. Korenevskiy N. A., Degtyarev S. V., Seregin S. P., Novikov A. V. Use of an Interactive Method for Classification in Problems of Medical Diagnosis. *Biomedical Engineering*, 2013, vol. 47, is. 4, pp. 169-172.

12. Korenevskiy N. A. Application of Fuzzy Logic for Decision-Making in Medical Expert Systems. *Biomedical Engineering*, 2015, vol. 49, pp. 46-49.

13. Korenevsky N. A., Rodionova S. N., Govorukhina T. N., Myasoedova M. A. Nechetkie modeli ocenki urovnya ergonomiki tekhnicheskih sistem i ee vliyanie na sostoyanie zdorov'ya cheloveka operatora s uchetom funkcional'nyh rezervov [Fuzzy models for assessing the level of ergonomics of technical systems and its impact on the human health of the operator, taking into account functional reserves]. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technologies*, 2019, vol. 7, no. 1 (24), pp. 39-53.

14. Korenevsky N. A., Bykov A. V., Tsymbal E. V., Aksenov V. V., Rodionov D. S. Prognozirovanie vozniknoveniya i recidiva insul'tov golovnogo mozga na osnove gibridnyh nechetkih modelej [Forecasting the occurrence and recurrence of brain strokes based on hybrid fuzzy models]. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technologies*, 2018, vol. 6, no. 3(22), pp. 50-72.

15. Korenevsky N. A., Shutkin A. N., Gorbatenko S. A., Serebrovsky V. I. Ocenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya obuchayushchihsya na osnove gibridnyh intellektual'nyh tekhnologij [Assessment and management of students' health on the basis of hybrid intelligent technologies]. Stary Oskol, TNT Publ., 2016. 472 p.

16. Korenevsky N. A., Tutov N. D., Lazurina L. P. Proektirovanie mediko-ekologicheskih informacionnyh sistem [Design of medical and environmental information systems]. Kursk, Kursk State Technical University Publ., 2001. 193 p.

17. Korenevsky N. A., Ivankov Yu. A., Yakovleva E. A., Savchenko N. N. Sintez nechetkih reshayushchih pravil dlya prognozirovaniya i rannej diagnostiki zabolevanij, vyzyvaemyh sostoyaniem okruzhayushchej sredy, s uchetom individual'nyh osobennostej organizma [Synthesis of fuzzy decision rules for forecasting and early diagnosis of diseases caused by the state of the environment, taking into account individual characteristics of the organism]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems,* 2007, vol. 6, no. 2, pp. 395-400.

18. Korenevsky N. A., Korostelev A. N., Starodubtseva L. V., Serebrovsky V. V. Metod ocenki funkcional'nogo rezerva cheloveka-operatora na osnove kombinirovannyh pravil nechetkogo vyvoda [A method for assessing the functional reserve of a human operator based on the combined rules of fuzzy inference]. *Biotekhnosfera = Biotechnosphere,* 2012, no. 1 (19), pp. 44-49.

19. Korenevsky N. A., Bashir A. S., Gorbatenko S. A. Sintez gibridnyh nechetkih pravil dlya prognozirovaniya, ocenki i upravleniya sostoyaniem zdorov'ya v ekologicheski neblagopriyatnyh regionah [Synthesis of hybrid fuzzy rules for forecasting, assessment and management of health in ecologically unfavorable regions]. *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*, 2013, no. 4, pp. 69-73.

20. Al-Kasasbeh R. T., Alshamasin M. S., Korenevskiy N., Maksim I. Method of ergonomics assessment of technical systems and its influence on operators heath on basis of hybrid fuzzy models. *Advances in Intelligent Systems and Computing,* 2018, vol. 590, pp. 581-592.

21. Al-Kasasbeh R. T., Alshamasin M., Korenevskiy N., Kuzmin A., Ionescou F. Synthesis of fuzzy logic for prediction and medical diagnostics by energy characteristics of acupuncture points. *JAMS Journal of Acupuncture and Meridian Studies,* 2011, vol. 4, no. 3, pp. 175-182.

22. Al-Kasasbeh R. T., Korenevskiy N. A., Alshamasin M. S., Korenevskya S. N., Al-Kasasbeh E. T., Maksim I. Fuzzy Model Evaluation of Vehicles Ergonomics and Its Influence on Occupational Diseases. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2018, pp. 143-154.

Информация об авторе / Information about the Author

Кореневский Николай Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Nikolai A. Korenevsky, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Аксёнов Виталий Вячеславович, заведующий лабораториями кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Vitaliy V. Aksenov, Head of Laboratories of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Родионова Софья Николаевна, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@uandex.ru, ORCID: 0000-0002-4477-3975

Sofya N. Rodionova, Post-Graduate Student of the Biomedical Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@uandex.ru, ORCID: 0000-0002-4477-3975

Гонтарев Сергей Николаевич, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой детской стоматологии, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: znamisng@mail.ru

Sergey N. Gontarev, Dr. of Sci. (Medical), Professor, Head of the Department of Pediatric Dentistry, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, e-mail: znamisng@mail.ru

Лазурина Людмила Петровна, доктор биологических наук, профессор, заведующая кафедрой биологической и химической технологии, Курский государственный медицинский университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kafbht@yandex.ru

Lyudmila P. Lazurina, Dr. of Sci. (Biological), Professor, Head of the Department of Biological and Chemical Technology, Kursk State Medical University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kafbht@yandex.ru

Сафронов Руслан Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электроэнергетики, Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: russafronov@yandex.ru

Ruslan I. Safronov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electric Power Engineering, Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov, Kursk, Russian Federation, e-mail: russafronov@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-97-108

CC BY 4.0

Применение CUDA ядер в задачах обработки информации в базе данных при помощи BLAZINGSQL

Т. И. Лапина [1] ✉, С. А. Филист[1], Ю. А. Криушина[1], Е. А. Криушин[1]

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

✉ e-mail: lapinati@mail.ru

Резюме

Цель *– исследование способа повышения оперативноти процессов обработки данных при помощи аппаратных видеоускорителей, имеющих в своём составе ядра CUDA.*

Методы. *Использован метод программного взаимодействия с аппаратными вычислительными средствами видеоускорителя, обладающего ядрами CUDA при помощи решения BlazingDB, базирующегося на RAPIDS AI. Для исследования производительности и ускорения процессов обработки данных используется база данных PostgresSQL и технология BlazingSQL.*

Результаты. *Применение BlazingDB ускоряет процесс обработки данных в несколько раз относительно PostgresSQL. Производительность технологии BlazingDB, использующей видеоускоритель вместо центрального процессора, превзошла PostgresSQL в 10 и 35 раз для двух различных массивных задач по выборке и обработке информации.*

Заключение. *Исследованы возможности аппаратных видеоускорителей при применении их для задач по обработке информации в базе данных; проведено сравнение производительности решения BlazingDB для взаимодействия с ядрами CUDA и стандартных решений PostgresSQL; рассмотренное решение демонстрирует многократное увеличение производительности обработки данных при помощи большого количества ядер CUDA видеоускорителя относительно центрального процессора, имеющего значительно меньшее количество ядер, но большую частоту работы.*

Ключевые слова: *BlazingDB; BlazingSQL; GPU; PostgresSQL; CUDA ядра; SQL на GPU; базы данных.*

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

Для цитирования: *Применение CUDA ядер в задачах обработки информации в базе данных при помощи BLAZINGSQL / Т. И. Лапина, С. А. Филист, Ю. А. Криушина, Е. А. Криушин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение.* 2022. Т. 12, № 3. С. 97–108. https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-97-108.

Поступила в редакцию 16.06.2022 *Подписана в печать 18.07.2022* *Опубликована 30.09.2022*

© Лапина Т. И., Филист С. А., Криушина Ю. А., Криушин Е. А., 2022

Application of CUDA Kernel in the Processing of Information in the Database Using BLAZINGSQL

Tatyana I. Lapina[1] ✉, Sergey A. Filist[1], Yulia A. Kriushina[1], Evgeniy A. Kriushin[1]

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

✉ e-mail: lapinati@mail.ru

Abstract

Purpose of research *a way to increase the efficiency of data processing processes using hardware video accelerators that have CUDA cores in their composition.*

Methods. *The method of software interaction with the hardware computing means of a video accelerator with CUDA cores using the BlazingDB solution based on RAPIDS AI was used. PostgresSQL database and BlazingSQL technology are used to study the performance and speed up data processing processes.*

Results. *The use of BlazingDB speeds up the data processing process several times relative to PostgresSQL. The performance of BlazingDB technology, which uses a video accelerator instead of a central processor, surpassed PostgresSQL by 10 and 35 times for two different massive data sampling and processing tasks.*

Conclusion. *The possibilities of hardware video accelerators when using them for information processing tasks in a database are investigated; the performance of the BlazingDB solution for interacting with CUDA cores and standard PostgresSQL solutions is compared; the considered solution demonstrates a multiple increase in data processing performance using a large number of CUDA video accelerator cores relative to the CPU, which has a significantly smaller number of cores, but a large the frequency of work.*

Keywords: *Blazing; Blazing SQL; GPU; Postgresql; CUDA cores; SQL on GPU; Databases.*

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

For citation: Lapina T. I., Filist S. A., Kriushina Yu. A., Kriushin E. A. Application of CUDA Kernel in the Processing of Information in the Database Using Blazingsql. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022; 12(3): 97–108. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-97-108.

Received 16.06.2022 *Accepted 18.07.2022* *Published 30.09.2022*

***

Введение

Анализ и обработка графической информации требуют оперирование с огромным объемом информации и значительное время для выполнения анализа. Выполнение таких операций с данным приводит к снижению производительности системы в целом.

Графический процессор (GPU, видеоускоритель) зарекомендовал себя как эффективный сопроцессор в области обычных вычислений. Графические процессоры NVIDIA отличаются производительностью параллельных вычислений за счёт специально спроектированных ядер CUDA (ALU) [1; 2; 3].

В современном GPU содержится порядка 2500 – 5000 ALU на процессоре, что делает возможным выполнение ты-

сяч умножений и сложений одновременно. На сегодняшний день GPU является наиболее популярной архитектурой процессоров для глубинного обучения и остаётся процессором общего назначения, который должен поддерживать миллион различных приложений и программного обеспечения.

CUDA – это модель программирования, с помощью которой повышается производительность с точки зрения времени для любых вычислений [4; 5; 6].

Хотя графические процессоры были разработаны для визуализации геометрических примитивов, их также можно использовать для эффективного выполнения операций с базой данных, используя присущие им конвейерную обработку и параллелизм, многопоточную архитектуру, функциональность векторной обработки графических процессоров наряду с одной инструкцией и возможности множественных данных (SIMD) для оценки полулинейных запросов, основанных на атрибутах. Усилия, необходимые администраторам баз данных для изучения таких языков, как CUDA, или изменения модулей, чтобы предоставить помощь библиотекам, которых нет в SQL, сокращаются [1; 7; 8].

Для работы с GPU применяется развиваемый при участии компании NVIDIA набор открытых библиотек RAPIDS, позволяющий создавать приложения для обработки данных и аналитики, выполняемые целиком на стороне GPU (предоставляется Python-интерфейс для использования низкоуровневых примитивов CUDA и распараллеливания вычислений).

BlazingSQL предоставляет возможность использования SQL вместо API обработки данных cuUDF (на базе Apache Arrow), применяемого в RAPIDS [9; 10; 11; 12]. BlazingSQL является дополнительной прослойкой, работающей поверх cuDF и использующей для чтения данных с диска библиотеку cuIO. SQL-запросы транслируются в вызовы функций cuUDF, позволяющие загружать данные в GPU и выполнять над ними операции слияния, агрегирования и фильтрации. Поддерживается создание распределённых конфигураций, охватывающих тысячи GPU [13; 14].

Материалы и методы

Для применения BlazingSQL необходимо соблюсти ряд требований, а именно: операционная система должна быть не ниже Ubuntu 16.02; обязательно наличие установленной Anaconda; графический процессор микроархитектуры Pascal или выше с индексом производительности не ниже 6; поддержка графическим ускорителем технологии CUDA 11 и выше; Python версии 3.7 и выше.

В рамках данной статьи для обработки данных будут использованы:

1. Аппаратные средства: процессор AMD Ryzen 2700 8/16 3.2ghz; оперативная память 2x8 GB DDR4 @ 3200 mhz; видеоускоритель NVIDIA GeForce GTX 1070 ti (микроархитектура Pascal, индекс производительности более чем 6.1)

(2432 ALU) 8GB GDDR5; накопитель nvme A-DATA SX8200 Pro 1TB.

2. Программные средства: операционная система Linux Ubuntu 20.04; язык программирования Python 3.8; BlazingSQL; PostgresSQL, Anaconda.

BlazingSQL может быть установлен с помощью conda (miniconda или полного дистрибутива Anaconda) из канала Blazing SQL (рис. 1).

Для исследования производительности будет использован набор информации объёмом ~12GB, являющий собой линейный массив состава изделий, представленный на рисунке 2.

```
conda install -c blazingsql -c rapidsai -c nvidia -c conda-forge -c defaults blazingsql python=3.8 cudatoolkit=11.2
```

Рис. 1. Установка BlazingSQL

Fig. 1. Installing BlazingSQL

Имя столбца	Тип данных
KUDA	nvarchar(MAX)
MOD	nvarchar(MAX)
CHTO	nvarchar(MAX)
KOL	float
PR	nvarchar(MAX)
MR	nvarchar(MAX)
PZ	nvarchar(MAX)

Рис. 2. Массив данных для исследования производительности

Fig. 2. Data set for performance research

Для определения состава изделия алгоритму необходимо совершить рекурсивный проход по массиву, аккумулируя результаты предыдущего прохода: SELECT * FROM Mass WHERE KUDA = Query[i].

Финальные изделия помечены в массиве данных при помощи уравнивания реквизитов KUDA и CHTO. Для получения их перечня производится поиск всех строк массива, отвечающего уравнению KUDA = CHTO.

Для минимизации кода необходимо реализовать рекурсивную функцию поиска, результатом работы которой будет массив данных состава изделия. Данную функцию необходимо вызвать столько раз, сколько изделий было обнаружено при поиске финальных изделий [4; 15]. Алгоритм получения полного состава всех изделий представлен ниже (рис. 3).

```
$QueryStr = "SELECT * FROM Mass WHERE KUDA = CHTO";
$DB = $this->DBConnect;
$conn = $DB->GetConn();
$Query = $conn->prepare($QueryStr);
$Query->execute();
$Products = $Query->fetchAll(PDO::FETCH_ASSOC);
$CompositionArray;
$TempArray;
function ReqSearch($ProductId)
{
   global $TempArray;
   $QueryStr = "SELECT * FROM Mass WHERE KUDA = '".$ProductId ."'";
   $DB = $this->DBConnect;
   $conn = $DB->GetConn();
   $Query = $conn->prepare($QueryStr);
   $Query->execute();
   $PartArr = $Query->fetchAll(PDO::FETCH_ASSOC);
   for($i = 0; $i < count($PartArr);$i++)
   {
         $TempArray[count($TempArray;)] = $PartArr[$i];
         if($PartArr[$i]['CHTO'] != $PartArr[$i]['KUDA'])
         {
               ReqSearch($PartArr[$i]['CHTO']);
         }
         Else
         {
               Break;
         }
   }
   Return $TempArray;
}
for ($i = 0; $i < count($Products);$i++)
{
   $CompositionArray[$i] = ReqSearch($Products[$i]['CHTO']);
   $TempArray = 0;
}
```

Рис. 3. Алгоритм получения полного состава всех изделий из массива данных

Fig. 3. Algorithm for obtaining the full composition of all products from the data array

При прохождении итерации цикла внутри функции производится проверка – сравнение реквизитов KUDA и CHTO для определения окончания работы функции [16; 17].

Результаты и их обсуждение

Применение BlazingSQL существенно повлияло на скорость обработки массива с целью получения полного состава каждого финального изделия. При применении метода внутреннего распараллеливания задачи на 2432 ALU вместо 16 потоков в процессоре рост производительности составил ~1000%. PostgresSQL оперировал лишь процессорными мощностями и оперативной памятью системы, дополнительно задействовал кэш-память операционной системы. Результаты исследования производительности представлены ниже (табл. 1).

Таблица 1. Исследование производительности при рекурсивной выборке состава всех финальных изделий

Table 1. Performance study with recursive sampling of the composition of all final products

Показатель	Время исполнения, с	Загрузка оперативной памяти, GB	Загрузка видеопамяти, GB	Загрузка CPU, %	Загрузка GPU, %
BlazingSQL	932 с	4,1	7,9	10	85
PostgresSQL	9465 с	15,7	0,1	95	1

Помимо использования гораздо большего количества ядер BlazingSQL применила более быструю видеопамять в отличие от PostgresSQL с оперативной памятью (7000mhz против 3200mhz).

При исследовании производительности обработки меньшего объёма данных (на примере поиска вхождения комплектующего в изделия) результат оказался более значительным [6; 18; 19]. Производительность BlazingSQL оказалась в 35 раз выше по сравнению с PostgresSQL, при этом потребления памяти у BlazingSQL оказалось в 3 раза меньше и полностью было покрыто ресурсами видеоускорителя (табл. 2).

Таблица 2. Исследование производительности при поиске вхождения комплектующего в финальное изделие

Table 2. Performance research when searching for the occurrence of a component in the final product

Показатель	Время исполнения, с	Загрузка оперативной памяти, GB	Загрузка видеопамяти, GB	Загрузка CPU, %	Загрузка GPU, %
BlazingSQL	33	1,1	2,6	7	77
PostgresSQL	1155	12,2	0,1	99	2

Отчётливо видна зависимость производительности BlazingSQL от объёма данных и объёма доступной видеопамяти. При условии вмещения всего объёма базы данных в видеопамять можно рассчитывать на прирост производительности при применении подходящего GPU классом не ниже GTX 1070ti не менее чем 35 раз [20; 21; 22].

Выводы

Обработка информации и поиск по базе данных при помощи BlazingSQL на графическом процессоре NVIDIA с использованием CUDA исследованы.

Замечено, что многопоточная архитектура CUDA в значительной степени способствуют повышению производительности. Существует огромная разница в результатах, полученных на CPU и на GPU.

Таким образом, программирование на CUDA является одним из лучших подходов к оптимизации времени для различных алгоритмов, требующих огромного объема данных, а применение готового решения в виде BlazingSQL сводит процесс программирования данным методом к минимуму. Однако требования, предъявляемые для применения вычислительных мощностей видеоускорителей, могут оказаться непросты в удовлетворении ввиду экзотичности подхода.

Список литературы

1. Обнаружение, распознавание и определение параметров образов объектов. Методы и алгоритмы / А. В. Богословский [и др.]; под ред. А. В. Коренного. М.: Радиотехника, 2012. 112 с.

2. Бойко И. А., Гурьянов Р. А. Распознавание объектов на основе видеосигнала, полученного с камеры, установленной на подвижной платформе // Молодой ученый. 2013. № 6 (53). С. 34-36.

3. Работягов А. Основы распознавания образов. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 273 с.

4. Автоматическое управление и вычислительная техника. Распознавание образов. М.: Машиностроение, 2016. Вып. 10. 256 с.

5. Миленький А. В. Классификация сигналов в условиях неопределенности. Статистические методы самообучения в распознавании образов. М.: Советское радио, 2017. 328 с.

6. Информационные технологии и вычислительные системы. Вычислительные системы. Компьютерная графика. Распознавание образов. Математическое моделирование / под ред. С. В. Емельянова. М.: Ленанд, 2015. 100 с.

7. Алгоритмы распознавания объектов / А. А. Цветков, Д. К. Шорох, М. Г. Зубарева [и др.]. // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы IV Международной научной конференции (г. Санкт-Петербург, июль 2016 г.). СПб.: Свое, 2016. С. 20-28.

8. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. М.: Наука, 2013. 368 с.

9. Дударев В. А. Методы распознавания образов в компьютерном конструировании неорганических соединений. М.: Синергия, 2014. 325 с.

10. Елисеева И. И., Рукавишников В. О. Группировка, корреляция, распознавание образов (статистические методы классификации и измерения связей). М.: Российский государственный гуманитарный университет, 2014. 144 с.

11. Информационные технологии и вычислительные системы. Вычислительные системы. Компьютерная графика. Распознавание образов. Математическое моделирование / под ред. С. В. Емельянова. М.: Мир, 2015. Вып. 2. 662 с.

12. Информационные технологии и вычислительные системы. Вычислительные системы. Математическое моделирование. Распознавание образов. Прикладные аспекты информатики / под ред. С. В. Емельянова. М.: Высшая школа, 2014. Вып. 3. 160 с.

13. Гренандер У. Лекции по теории образов. М.: Мир, 2014. Т. 2. 342 с.

14. Гренандер У. Лекции по теории образов. М.: Мир, 2014. Т. 3. 432 с.

15. Гренандер У. Лекции по теории образов. М.: Мир, 2014. Т. 1. 571 с.

16. Применение CUDA и тензорных ядер в задачах обнаружения и распознавания объектов / С. В. Дегтерев, Т. И. Лапина, Ю. А. Криушина, Е. А. Криушин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 1. С. 99-110. https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-99-110.

17. Лапина Т. И., Криушин Е. Формирование аналитических запросов на основе и рекурсии // Информационные системы и технологии: материалы докладов III Международной научно-технической конференции, Курск, 17 мая 2017 года. Курск: Университетская книга, 2017. С. 26-32.

18. Информационные технологии и вычислительные системы: Обработка информации и анализ данных. Программная инженерия. Математическое моделирование. Прикладные аспекты информатики / под ред. С. В. Емельянова. М.: Ленанд, 2015. 104 с.

19. Гендерная классификация по изображению лица / Л. А. Шмаглит, М. Н. Голубев, А. Н. Ганин, В. В. Хрящев // Цифровая обработка сигналов и ее применение: доклады XIV Международной конференции (DSPA-2012). М., 2012. Т. 2. С. 425.

20. Системное моделирование. Наукометрия и управление наукой. Распознавание образов / под ред. С. В. Емельянова. М.: Ленанд, 2015. 104 с.

21. Математические модели социально-экономических процессов. Моделирование характеристик деятельности отраслевых и региональных подсистем. Динамические системы. Математические проблемы динамики неоднородных систем. Информационные технологии / под ред. С. В. Емельянова. М.: Ленанд, 2015. 112 с.

22. Потапов А. Автоматический анализ изображений и распознавание образов. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2017. 292 с.

References

1. Bogoslovsky A. V., eds. Obnaruzhenie, raspoznavanie i opredelenie parametrov obrazov ob"ektov. Metody i algoritmy [Detection, recognition and determination of the parameters of object images. Methods and algorithms]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012. 112 p.

2. Boyko I. A., Guryanov R. A. Gur'yanov Raspoznavanie ob"ektov na osnove videosignala, poluchennogo s kamery, ustanovlennoi na podvizhnoi platforme [Object recognition based on the video signal received from a camera installed on a mobile platform]. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*, 2013, no. 6 (53), pp. 34-36.

3. Rabotyagov A. Osnovy raspoznavaniya obrazov [Fundamentals of pattern recognition]. Moscow, LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 273 p.

4. Avtomaticheskoe upravlenie i vychislitel'naya tekhnika. Raspoznavanie obrazov [Automatic control and computer technology. Pattern recognition]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 2016, is. 10. 256 p.

5. Milenky A. V. Klassifikatsiya signalov v usloviyakh neopredelennosti. Statisticheskie metody samoobucheniya v raspoznavanii obrazov [Classification of signals in conditions of uncertainty. Statistical methods of self-learning in pattern recognition]. Moscow, Soviet radio Publ., 2017. 328 p.

6. Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. Vychislitel'nye sistemy. Komp'yuternaya grafika. Raspoznavanie obrazov. Matematicheskoe modelirovanie [Information technologies and computing systems. Computing systems. Computer graphics. Pattern recognition. Mathematical modeling]; ed. by S. V. Emelyanov. Moscow, Lenand, 2015. 100 p.

7. Tsvetkov A. A., Shorokh D. K., Zubareva M. G., eds. [Object recognition algorithms]. *Tekhnicheskie nauki: problemy i perspektivy. Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (g. Sankt-Peterburg, iyul' 2016 g.)* [Technical sciences: problems and prospects. Materials of the IV International Scientific Conference (St. Petersburg, July 2016)]. St. Petersburg, Own Publishing House, 2016, pp. 20-28. (In Russ.)

8. Fukunaga K. Vvedenie v statisticheskuyu teoriyu raspoznavaniya obrazov [Introduction to the statistical theory of pattern recognition]. Moscow, Nauka Publ., 2013. 368 p.

9. Dudarev V. A. Metody raspoznavaniya obrazov v komp'yuternom konstruirovanii neorganicheskikh soedinenii [Methods of pattern recognition in computer design of inorganic compounds]. Moscow, Synergy Publ., 2014. 325 p.

10. Eliseeva I. I., Rukavishnikov V. O. Gruppirovka, korrelyatsiya, raspoznava-nie obrazov (statisticheskie metody klassifikatsii i izmereniya svyazei) [Grouping, correlation, pattern

recognition (statistical methods of classification and measurement of connections)]. Moscow, RGGU Publ., 2014. 144 p.

11. Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. Vychislitel'nye sistemy. Komp'yuternaya grafika. Raspoznavanie obrazov. Matematicheskoe modelirovanie [Information technology and computing systems. Computing systems. Computer graphics. Pattern recognition. Mathematical modeling]; ed. by S. V. Emelyanov. Moscow, Mir Publ., 2015, is. 2. 662 p.

12. Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. Vychislitel'nye sistemy. Matematicheskoe modelirovanie. Raspoznavanie obrazov. Prikladnye aspekty informatiki [Information technology and computing systems. Computing systems. Mathematical modeling. Pattern recognition. Applied Aspects of Informatics]; ed. by S. V. Emelyanov. Moscow, Higher school Publ., 2014, is. 3. 160 p.

13. Grenander W. Lektsii po teorii obrazov [Lectures on the theory of images]. Moscow, Mir Publ., 2016, vol. 2. 342 p.

14. Grenander W. Lektsii po teorii obrazov [Lectures on the theory of images]. Moscow, Mir Publ., 2012, vol. 3. 432 p.

15. Grenander W. Lektsii po teorii obrazov [Lectures on the theory of images]. Moscow, Mir Publ., 2014, vol. 1. 571 p.

16. Degterev S. V., Lapina T. I., Kriushina Yu. A., Kriushin E. A. Primenenie CUDA i tenzornykh yader v zadachakh obnaruzheniya i raspoznavaniya ob"ektov [Application of CUDA and tensor cores in problems of detection and recognition of objects]. *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, vol. 12, no. 1, pp. 99-110. https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-99-110

17. Lapina T. I., Kriushin E. [Formation of analytical queries based on and recursion]. Informatsionnye sistemy i tekhnologii. *Materialy dokladov III Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Information systems and technologies. Proceedings of the III International Scientific and Technical Conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2017, pp. 26-32. (In Russ.)

18. Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. Vychislitel'nye sistemy. Komp'yuternaya grafika. Raspoznavanie obrazov. Matematicheskoe modelirovanie. Prikladnye aspekty informatiki [Information technology and computing systems: Information processing and data analysis. Software engineering. Mathematical modeling. Applied Aspects of Informatics]; ed. by S. V. Emelyanov. Moscow, Lenand Publ., 2015. 104 p.

19. Shmaglit L. A., Golubev M. N., Ganin A. N., Khryashchev V. V. [Gender classification by facial image]. *Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primenenie. Doklady XIV Mezhdunarodnoi konferentsii (DSPA-2012)* [Digital signal processing and its application. Reports of the XIV International Conference (DSPA-2012)]. Moscow, 2012, vol. 2, pp. 425. (In Russ.)

20. Sistemnoe modelirovanie. Naukometriya i upravlenie naukoi. Raspoznavanie obrazov [System modeling. Scientometrics and Science Management. Pattern Recognition]; ed. by S. V. Emelyanov. Moscow, Lenand Publ., 2015. 104 p.

21. Matematicheskie modeli sotsial'no-ekonomicheskikh protsessov. Modelirovanie kharakteristik deyatel'nosti otraslevykh i regional'nykh podsistem. Dinamicheskie sistemy. Matematicheskie problemy dinamiki neodnorodnykh sistem. Informatsionnye tekhnologii [Mathematical models of socio-economic processes. Modeling the performance characteristics of sectoral and regional subsystems. Dynamical systems. Mathematical problems of the dynamics of inhomogeneous systems. Information technologies]; ed. by S. V. Emelyanov. Moscow, Lenand Publ., 2015. 112 p.

22. Potapov A. Avtomaticheskii analiz izobrazhenii i raspoznavanie obrazov [Automatic image analysis and pattern recognition]. Moscow, LAP Lambert Academic Publishing, 2017. 292 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Лапина Татьяна Ивановна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: lapinati@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-7959-3053

Tatyana I. Lapina, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Computer Science Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: lapinati@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-7959-3053

Филист Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: sfilist@gmail.com

Sergey A. Filist, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: sfilist@gmail.com

Криушина Юлия Алексеевна, аспирант,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: July.tchict@yandex.ru

Yulia A. Kriushina, Post-Graduate Student,
Southwest State University, Kursk,
Russian Federation,
e-mail: july.tchict@yandex.ru

Криушин Евгений Александрович, аспирант,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: eugeniyPWN@gmail.com

Evgeniy A. Kriushin, Post-Graduate Student,
Southwest State University, Kursk,
Russian Federation,
e-mail: eugeniyPWN@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-109-125

CC BY 4.0

Алгоритмы визуализации потоковых данных программ обработки медицинских сигналов в ОС WINDOWS

А. А. Кузьмин[1] ✉, М. Б. Мяснянкин[1], А. А. Маслак[2], С. А. Филист[1]

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

[2] Филиал Кубанского государственного университета в г. Славянске-на-Кубани
ул. Кубанская 200, г. Славянск-на-Кубани 353560, Российская Федерация

✉ e-mail: Ku3bmin@gmail.com

Резюме

Цель исследования *– разработка алгоритмов визуализации многоканальных потоков биомедицинских данных в процессе мониторинга функционального состояния пациента.*

Методы*. Предложены алгоритмы представления многоканальных мониторинговых биомедицинских сигналов в виде графиков на экране видеомонитора. Показаны проблемы построения систем обработки и визуализации данных в операционной системе Windows. Для решения задачи выполнения пауз потоков при проектировании систем обработки сигналов в реальном времени предложено использовать «счетчики производительности» – специальные регистры центрального процессора, которые позволяют отмерять временные интервалы с точностью до долей микросекунд. Разработан алгоритм процедуры выполнения пауз в системах обработки сигналов в реальном времени в операционной системе Windows на основе счетчиков производительности. Алгоритм основан на включении в цикл опроса состояния счетчика производительности функции Sleep с нулевым аргументом.*

Результаты. *В многоканальных системах мониторинга биомедицинских данных предложено использовать конвейерную обработку, при которой происходит дробление общего вычислительного процесса на определенные стадии, называемые ступенями. На каждую ступень выделяется отдельная часть аппаратных средств. Выполнена апробация алгоритма работы ступени визуализации многоканальных данных. Алгоритм выполняет инициализацию устройства отображения, а затем рабочий цикл отрисовки графики на основе поставляемых данных. На основе предложенного алгоритма разработан монитор биосигналов (электромиосигнала и электрокардиосигнала), позволяющий отрисовывать несколько тысяч графических примитивов в секунду и в реальном времени отображать сигналы на экране видеомонитора.*

Заключение. *В ходе проведенного исследования были разработаны алгоритмы визуализации потоковых данных медицинских сигналов в операционной системе Windows. Источниками данных являлось разнообразное медицинское оборудование, такое как усилители биопотенциалов, электрокардиографы, пульсоксиметры, пульсометры и т. п., а также системы для вычисления диагностических показателей. Алгоритмы ориентированы на объектно ориентированное программное обеспечение, что позволяет внедрять его в новые системы регистрации медицинских сигналов в операционной системе Windows.*

Ключевые слова: *алгоритм; ступени визуализации данных; счетчик производительности; таймер.*

© Кузьмин А. А., Мяснянкин М. Б., Маслак А. А., Филист С. А., 2022

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

***Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90058.*

Для цитирования: Алгоритмы визуализации потоковых данных программ обработки медицинских сигналов в ОС WINDOWS / А. А. Кузьмин, М. Б. Мяснянкин, А. А. Маслак, С. А. Филист // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 3. С. 109–125. https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-109-125.

Поступила в редакцию 11.06.2022 *Подписана в печать 12.07.2022* *Опубликована 30.09.2022*

Algorithms for Visualization of Streaming Data of Medical Signal Processing Programs in WINDOWS OS

Alexander A. Kuzmin[1] ✉, Maksim B. Myasnyankin[1], Anatoly A. Maslak[2], Sergey A. Filist[1]

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

[2] Branch of the “Kuban State University” in Slavyansk-on-Kuban
200 Kubanskaya Str., Slavyansk-on-Kuban 353560, Russian Federation

✉ e-mail: Ku3bmin@gmail.com

Abstract

***Purpose of research** is development of algorithms for visualization of multichannel threads of biomedical data in the process of monitoring the functional state of a patient.*

***Methods.** Algorithms for representing multichannel monitoring biomedical signals in the form of graphs on the screen of a video monitor are proposed. The problems of building data processing and visualization systems in the Windows operating system are shown., It is proposed to use "performance counters" - special registers of the central processor that allow you to measure time intervals with an accuracy of fractions of microseconds to solve the problem of performing thread pauses when designing real-time signal processing systems. An algorithm for the procedure for performing pauses in real-time signal processing systems in the Windows operating system based on performance counters has been developed. The algorithm is based on including the Sleep function with a zero argument in the performance counter status polling loop.*

***Results**. In multichannel systems for monitoring biomedical data, it is proposed to use pipeline processing, in which the overall computational process is split into certain stages, called steps. A separate piece of hardware is allocated for each stage. Approbation of the operation algorithm of the stage of visualization of multichannel data has been carried out. The algorithm performs display device initialization and then a graphics rendering workflow based on the supplied data. Based on the proposed algorithm, a monitor of biosignals (electromyosignal and electrocardiosignal) was developed, which allows drawing several thousand graphic primitives per second and displaying signals in real time on the video monitor screen.*

***Conclusion**. In the course of the study, algorithms for visualizing streaming data of medical signals in the Windows operating system were developed. Data sources were a variety of medical equipment, such as biopotential amplifiers,*

electrocardiographs, pulse oximeters, heart rate monitors, etc., as well as systems for calculating diagnostic indicators. The algorithms are focused on object-oriented software, which makes it possible to implement it in new systems for recording medical signals in the Windows operating system.

Keywords: *algorithm, data visualization stages, performance counter, timer.*

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

Funding: *The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90058.*

For citation: Kuzmin A. A., Myasnyankin M. B., Maslak A. A., Filist S. A. Algorithms for Visualization of Streaming Data of Medical Signal Processing Programs in WINDOWS OS. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022; 12(3): 109–125. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-109-125.

Received 11.06.2022 *Accepted 12.07.2022* *Published 30.09.2022*

***

Введение

Наибольшее количество информации человек получает через зрение. Поэтому представление данных в графической форме является наиболее эффективным способом передачи информации человеку для восприятия. Как правило, визуализация информации является финальной ступенью в конвейере обработки данных систем обработки медицинских сигналов. В медицинской диагностике приходится анализировать самые разнообразные сигналы с различными спектральными характеристиками, с различными информативными апертурами наблюдения и различными схемами модуляции медленными волнами [1; 2; 3; 4].

Известно множество автоматизированных программных комплексов для обработки биомедицинских сигналов, которые осуществляют отображение графических данных для их анализа непосредственно врачом или программными средствами [5; 6; 7; 8]. Среди этих комплексов можем выделить системы, в которых релевантной диагностической информацией являются показатели синхронности двух или более биомедицинских сигналов. В такой ситуации речь идет о многопоточной обработке данных, результаты которой представляются в виде графиков наблюдаемых процессов или их маркеров [9; 10; 11; 12].

Для вывода графики в операционной системе Windows существует несколько механизмов: вывод графики посредством графического пользовательского интерфейса GUI, использование библиотек OpenGl, DirectX и т. п. Использование графического пользовательского интерфейса GUI характеризуется относительной простотой, однако требует выполнения всех графических операций в основном потоке программы, что является одной из причин относительно медленной скорости работы такого подхода. Поэтому специально для видеоигр, где скорость вывода

графики критична, в операционной системе Windows были разработаны графические библиотеки, такие как OpenGl, DirectX. Причем, если библиотека Direct3D пакета DirectX предназначена в основном для видеоигр, то библиотека OpenGL характеризуется широтой своего применения и вполне может использоваться для вывода графической информации в профессиональных приложениях, таких как системы визуализации научных данных [13]. При этом скорость вывода графики у библиотеки OpenGL при наличии графического видеоускорителя в компьютерной системе в десятки раз превышает скорость вывода графики посредством графического пользовательского интерфейса GUI. При этом разработчику предоставляется единый программный интерфейс (API), который скрывает нюансы своей реализации на графических ускорителях с разной аппаратной платформой. Это позволяет писать единый код для разных аппаратных платформ, от архитектуры которых будет зависеть только эффективность работы кода.

Материалы и методы

Для работы библиотеки OpenGl сначала нужно получить контекст устройства с помощью функции GetDC из стандартного заголовка Windows winuser.h. Затем необходимо с помощью функции ChoosePixelFormat из заголовка wingdi.h выбрать формат пикселя на заданном устройстве (задаются такие параметры, как палитровое представление цвета или с помощью компонент RGB, тип данных буфера RGB-компонент – 8 битный или 24-битный, тип слоя – главный слой, второстепенный слой, величина альфа-композитинга, параметры буфера для пикселя – двойной, стерео и т. п.).

Затем с помощью функции wglCreateContext заголовка wingdi.h на заданном контексте устройства создается контекст рендеринга OpenGl, что позволяет использовать функции отрисовки в буфере графических примитивов. После окончания использования контекста рендеринга (в случае окончания работы программы, например) его необходимо закрывать с помощью функции wglDeleteContext для ликвидации возможных утечек памяти.

Для вывода графиков медицинских сигналов в основном используются функции отрисовки примитивов (линий) по двум вершинам, задаваемым с помощью функций glBegin, glEnd и glVertex2f. Функция glBegin сигнализирует начало ввода графического примитива, в частности, с аргументом GL_LINES графическим примитивом будут отрезки прямых, которыми можно интерполировать сэмплированные медицинские сигналы. Функция glVertex2f задает вершины графических примитивов (в нашем случае – линий), а функция glEnd означает конец ввода графического примитива.

При отрисовке сцен используется схема двух видеобуферов: пока пользователю демонстрируется основной бу-

фер, в дополнительном буфере происходит отрисовка всех необходимых структур (примитивов). После окончания процесса отрисовки необходимо задать таймер, по истечении времени срабатывания которого происходит замена буферов: основной буфер становится второстепенным и в нем будет происходить будущая отрисовка сцены, а второстепенный буфер становится основным и демонстрируется пользователю. Время таймера надо задать в районе десятков миллисекунд для того, чтобы иметь частоту смену кадров от 30 до 60 в секунду. Такой подход обеспечивает плавность изменения графической картинки и отсутствие артефактов представления примитивов в реальном времени. При аналоговом выводе графики на мониторы также учитывается момент вертикальной синхронизации кадров для смены видеобуферов для ликвидации эффекта «мерцания» изображения.

Как правило, в аппаратном обеспечении многоканальных систем сбора данных частота дискретизации сигнала задается достаточно точно с использованием кварцевых резонаторов. Тогда функции замера времени таймером можно возложить на ступени-источники данных. К примеру, если пакет данных приходит в источник данных раз в 5 миллисекунд, то необходимо 5 порций данных от источника данных для формирования задержки в 25 миллисекунд, что приведет к частоте смены кадров примерно 1000/25 = 40 кадров в секунду. Это укладывается в требуемый диапазон от 30 до 60 кадров в секунду.

Можно использовать для отрезков времени и собственные таймеры компьютерной системы. Тогда может возникнуть проблема того, что аппаратные источники данных не смогут вовремя предоставить свежую порцию данных, т. е. не смогут работать в темпе задатчика частоты дискретизации. Тогда компьютер должен принять меры для заполнения недостающей информации – или использовать предыдущие значения от аппаратного источника, или экстраполировать недостающие данные.

Другой проблемой является переизбыток данных от аппаратных источников данных, т. е. частота дискретизации сигналов аппаратной части комплекса будет превышать частоту дискретизации сигналов, задаваемую собственными таймерами компьютерной системы. В таком случае компьютерная система может или игнорировать «лишнюю» информацию, или вычислять какой-нибудь функционал от поступающих значений, к примеру, брать средневзвешенное значение, используя цифровую фильтрацию.

Еще одной проблемой является слишком быстрая отработка процедуры визуализации на компьютерах с мощным процессором и видеоускорителем. Это может привести к такому эффекту, что одни и те же данные будут отрисовываться по несколько раз. Для блоки-

ровки такого эффекта рекомендуется искусственно снижать скорость отработки визуализации кадра до времени 0,9–1 мс. Однако операционная система Windows не является операционной системой реального времени (RTOS) и характеризуется различием выполнения операций реального времени от версии к версии Windows. Так, к примеру, в Windows 7 (и в предыдущих версиях) системная функция API задержки Sleep(1) выполняется достаточно точно за 1 мс, в то время как на Windows 10 та же самая команда может выполняться и 20, и даже иногда 40 мс. Получается, что для более новых версий Windows для задания временных задержек нельзя использовать функцию Sleep и необходимо использовать альтернативные подходы [14; 15].

Рассмотрим процесс организации пауз в потоках операционной системы Windows подробнее. Как уже отмечалось, самым распространённым способом организации пауз в операционной системе Windows является использование функции API «Sleep(ms);», где ms – это количество миллисекунд, на которые «засыпает» поток, передавая процессорные вычислительные возможности другим потокам. Эта функция есть во всех версиях Windows. Тип аргумента ms – long, это значит, что аргумент может быть только целочисленным. Отсюда следует вывод, что максимальная частота переключений между потоками (в нашем случае – максимальная частота дискретизации сигнала) может составлять до 1 кГц. Допустима команда с нулевым аргументом, тогда текущий поток передает управление другим потокам и сразу продолжает свое выполнение, если есть свободные кванты вычислительных ресурсов процессора [16; 17].

Основная проблема – это точность, с которой Windows обеспечивает формирование паузы. В документации Windows [18] можно найти более точное описание аргумента функции Sleep – это миллисекунды, на неменьшее количество которых «заснет» текущий поток. И если до версии включительно Windows 7 выражение Sleep(1) выполнялось 1 мс с точностью в единицы процентов, то начиная с версии Windows 8 фирма Microsoft изменила алгоритмы представления процессорного времени потокам и выражение Sleep(1) стало выполняться десятки миллисекунд. Для проектирования систем обработки сигналов в реальном времени такая точность неприемлема [7; 19; 20].

Как известно, Windows предоставляет процессорное время квантами. И иногда значение по умолчанию составляет 20 мс. Для регулировки этого кванта существуют системные мультимедийные функции time BeginPeriod/timeEndPeriod, потому что фирма Microsoft считает, что повышенная точность предоставления временных отрезков нужна только мультимедийным приложениям. Однако предварительные исследования на операционной системе Windows 10 показали, что системные мультимедийные функции

timeBeginPeriod/timeEndPeriod не работают для уменьшения кванта, т. е., несмотря на произведенную настройку с помощью системных мультимедийных функций timeBeginPeriod/timeEndPeriod, выражение Sleep(1) все равно выполнялось десятки миллисекунд.

Рассмотрим финальный алгоритм задания пауз (рис. 1). Для решения задачи выполнения пауз потоков при проектировании систем обработки сигналов в реальном времени было принято решение использовать «счетчики производительности». Счетчики производительности (performance counters) – это специальные регистры центрального процессора, которые позволяют отмерять временные интервалы с точностью до долей микросекунд.

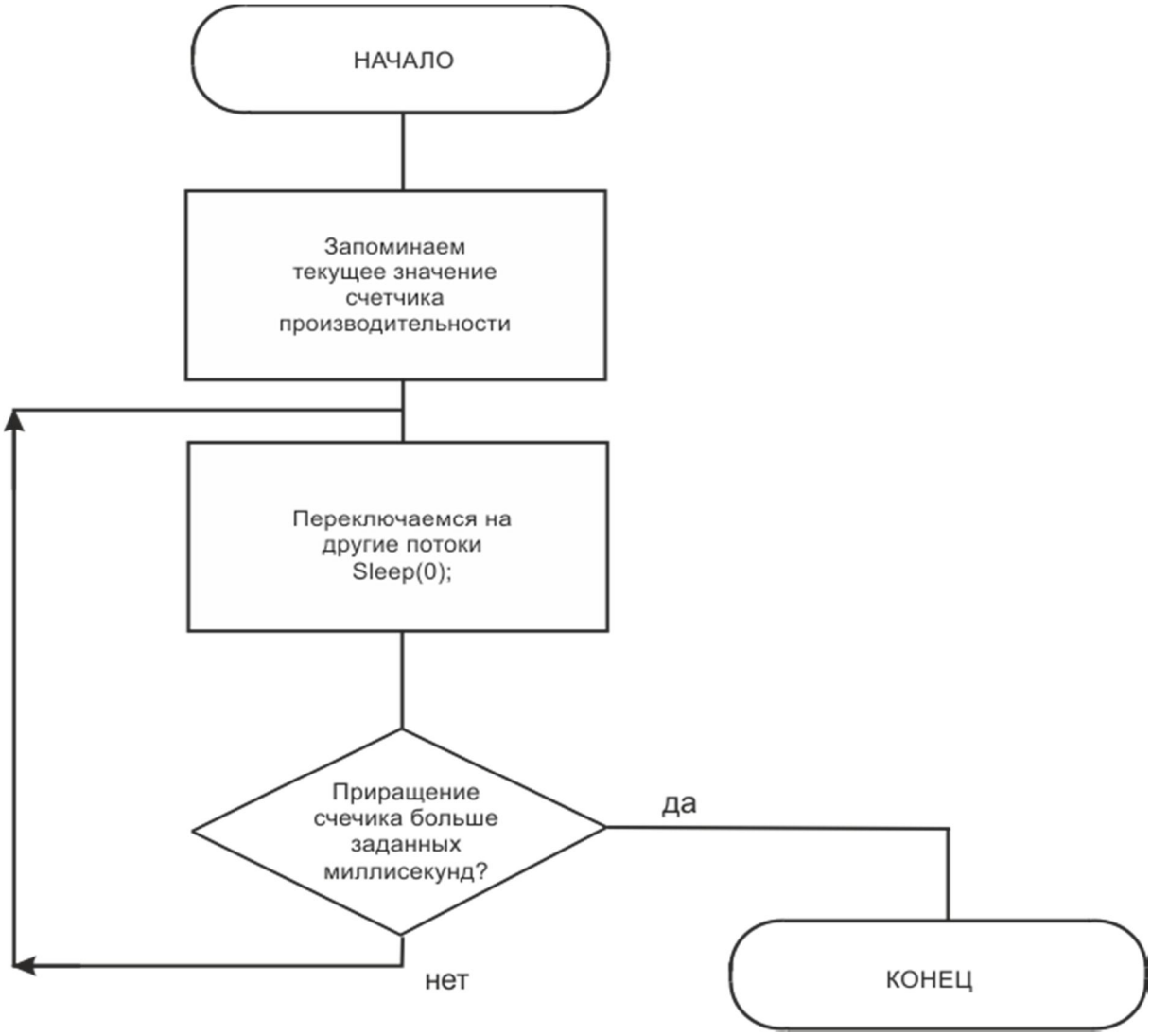


Рис. 1. Алгоритм процедуры выполнения пауз в системах обработки сигналов в реальном времени в операционной системе Windows на основе счетчиков производительности

Fig. 1. Algorithm for the procedure for performing pauses in real-time signal processing systems in the Windows operating system based on performance counters

Для доступа к этим счетчикам существует функция Win32 API, которая доступна начиная с версии Windows 2000: QueryPerformanceCounter. Аргументом у этой функции является ссылка на переменную типа LARGE_INTEGER, в которую возвращается текущее количество тиков счетчика производительности. Временной промежуток можно измерить в миллисекундах путем нахождения приращения счетчика производительности и разделения этого приращения на макрозначение CLOCKS_PER_SEC, которое в большинстве случаев составляет 3000 единиц.

Таким образом, если в цикле опрашивать значение счетчика производительности, то можно сформировать паузу нужной длительности. Еще одной проблемой является то, что процесс непрерывного опроса счетчика производительности занимает все процессорное время, которое необходимо для работы других задач. Эта проблема может быть частично решена путем включения в цикл опроса функции Sleep с нулевым аргументом (см. выше). Тогда после очередного опроса счетчика производительности поток источника данных будет отключаться от процессорного времени, предоставляя вычислительные ресурсы процессора другим потокам. Такой подход не снижает общей загруженности процессора, но при этом и предоставляет процессорное время всем необходимым потокам. Такое решение, несмотря на не совсем эффективное энергопотребление, было признано приемлемым для решения задачи выполнения пауз потоков при проектировании систем обработки сигналов в реальном времени. Точность выполнения миллисекундных пауз при таком подходе составила менее десятой доли процента, что является отличным результатом.

Результаты и их обсуждение

Анализируя вышесказанное, можно утверждать, что для реализации необходимого функционала организации пауз длительностью от микросекунд до единиц миллисекунд целесообразно использовать счетчики производительности (performance counters). Тогда можно измерить время выполнения текущего задания по отрисовке кадра. Если полученная величина оказалась меньше 900 микросекунд, то необходимо организовать паузу (на основе цикла с функцией Sleep и нулевым аргументом) такой длительности, чтобы в сумме со временем, потраченным на отрисовку кадра, суммарный результат длительности составлял 900 микросекунд.

Алгоритм работы ступени визуализации представлен на рисунке 2.

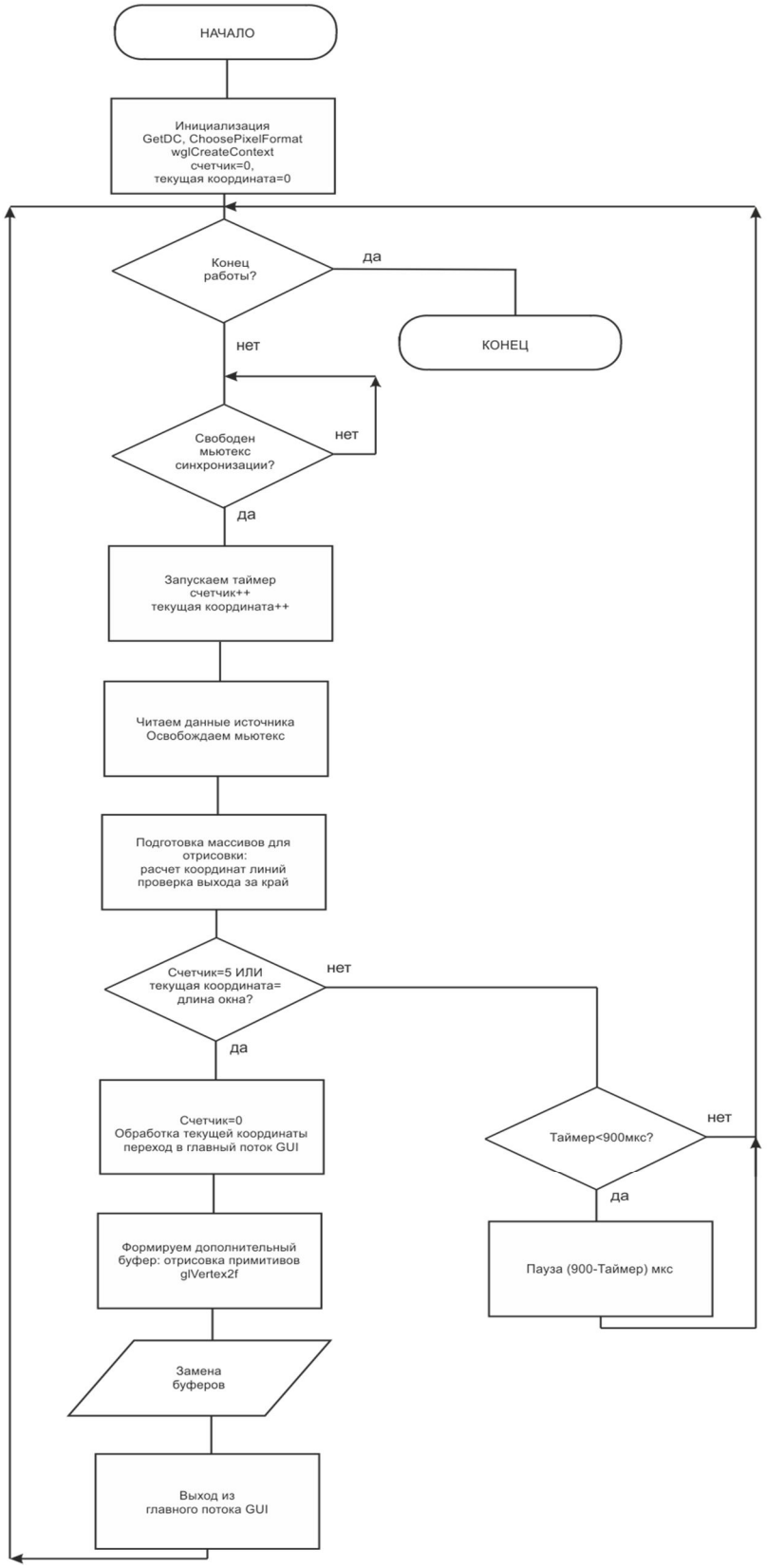


Рис. 2. Алгоритм работы ступени визуализации данных

Fig. 2. Algorithm of the data visualization stage

Выполнение алгоритма начинается с инициализации, получения контекста устройства, выбора графического формата пикселей, создания контекста OpenGL, обнуления текущих счетчиков и переменных. Потом алгоритм реализует цикл, внутри которого проверяется флаг выхода из цикла, сигнализирующего конец работы, после чего освобождаются занятые ресурсы, очищается выделенная память, и поток завершает свое существование. Внутри основного цикла сначала происходит зацикленный опрос мьютекса синхронизации с помощью функции WaitForSingleObject. Этот опрос не требует процессорного времени и может лимитироваться таймаутами по времени.

После получения информации об освобождении мьютекса, а это сигнализирует о готовности входных данных, происходит запуск таймера для замера производительности, инкремент счетчика и переменной текущей координаты. Затем читаются данные источника и освобождается мьютекс для других потоков. Далее происходит подготовка массивов, содержащих значения графиков для последующей отрисовки этой информации на экране.

Вслед за тем происходит проверка значения счетчика: если оно равно 5, то это характеризует 5 полученных квантов данных, каждый из которых поступает раз в 5 мс, что в сумме дает интервал времени 25 мс и частоту смену кадров около 40 в секунду. Также кадр сменяется при условии, что текущая координата дошла до конца окна. Процесс смены кадра начинается с обнуления счетчика, обработки текущей координаты (обнуления ее, если произошло достижение края окна), перехода в главный поток GUI (для синхронизации потоков вывода графики), отрисовки графических примитивов с помощью функции glVertex2f и массивов вершин, сформированных ранее, а также заменой буферов: основной буфер памяти становится дополнительным, а дополнительный основным и отображается на экране. После процесса замены буферов поток визуализации выходит из главного потока GUI и продолжает выполнять основной цикл параллельно.

Если счетчик не достиг значения 5 и не зафиксировано достижение текущей координаты края окна, то тогда анализируется скорость отработки основного цикла путем опроса таймера, который был запущен в самом начале функции обработки. Если скорость обработки слишком быстрая и таймер показывает время обработки менее 900 мкс, то тогда организуется задержка на величину, которая дополняет время обработки до значения 900 мкс. Такой алгоритм работы предотвращает ранее описанный эффект слишком быстрой отработки процедуры визуализации на компьютерах с мощным процессором и видеоускорителем. После отработки паузы

главный цикл алгоритма запускается заново.

Представленный алгоритм был реализован в программном обеспечении для регистрации 2-канальной ЭМГ в реальном времени. Выводились на экран в реальном времени 2 канала ЭМГ и 1 канал вычисленных показателей (интеграл мощности сигнала в окне). Испытания проводились на ноутбуке с процессором AMD Ryzen 5 3500U с видеоускорителем Radeon Vega Mobile GFX. Вывод графика из порядка 12000 вершин (1920 отсчетов ширины экрана * 3 канала информации * 2 вершины на линию) занимал в среднем около 14 мс, это соответствует частоте смены кадра около 70 fps. Вид интерфейсного окна и пример графиков приведены на рисунке 3.

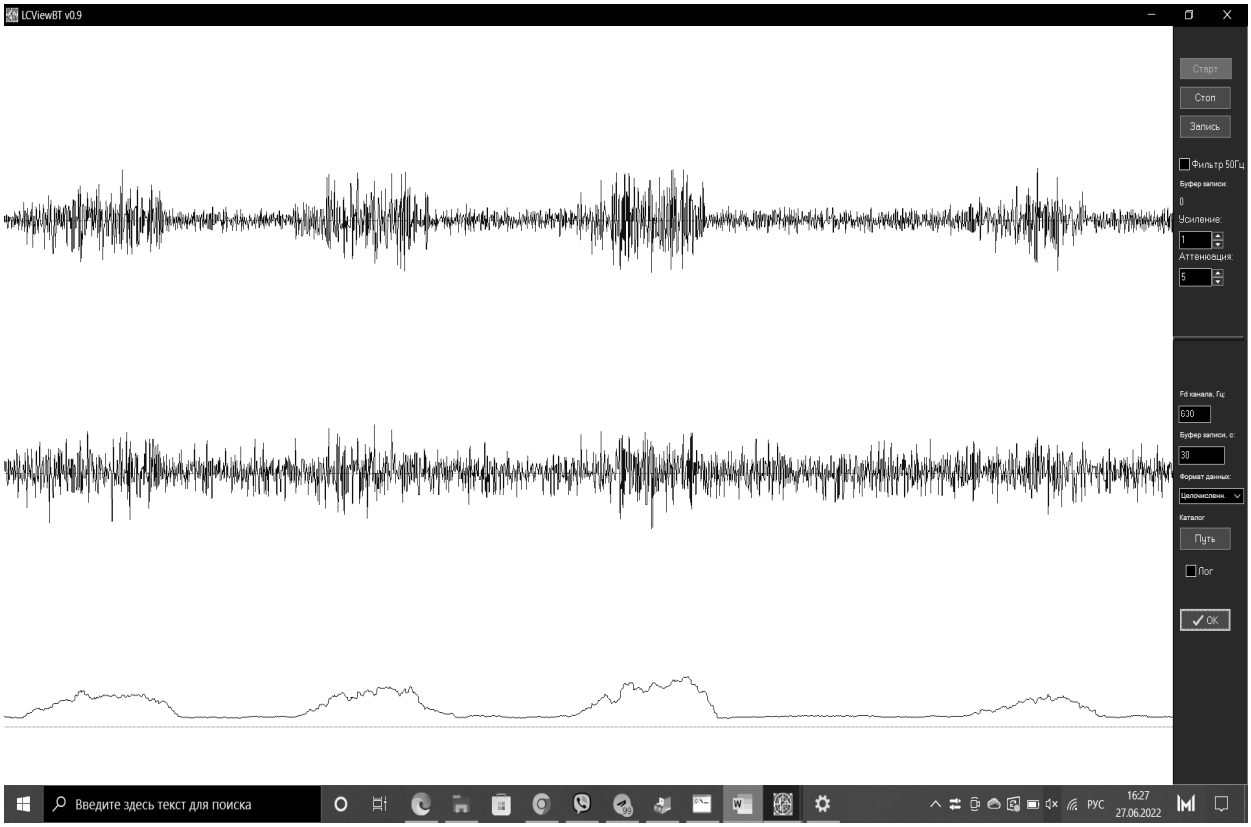


Рис. 3. Пример реализации алгоритма работы ступени визуализации данных – 2 канала ЭМГ и канал с мощностью сигнала в окне

Fig. 3. An example of the implementation of the algorithm of the data visualization stage – 2 EMG channels and a channel with a signal strength in the window

Выводы

Были разработаны алгоритмы визуализации потоковых данных медицинских сигналов в операционной системе Windows. Источниками данных являлось разнообразное медицинское оборудование, такое как усилители биопотенциалов, электрокардиографы, пульсоксиметры, пульсометры и т. п., а также системы для вычисления диагностиче-

ских показателей. Алгоритмы были реализованы в программном обеспечении, которое проектировалось с использованием объектно ориентированных принципов наследования, что позволяет внедрять его в новые системы регистрации медицинских сигналов в операционной системе Windows.

Список литературы

1. Формирование дескрипторов для классификаторов функционального состояния системы дыхания на основе спектрального анализа электрокардиосигнала / М. Б. Мяснянкин, С. А. Филист, А. В. Киселев, А. А. Кузьмин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 8-28.

2. Классификация функционального состояния системы дыхания на основе анализа вариабельности медленных волн VLF-диапазона / А. В. Киселев, А. А. Кузьмин, М. Б. Мяснянкин, А. А. Маслак, С. А. Филист, А. Ф. Рыбочкин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 1. С. 8-32.

3. Метод и алгоритмы декодирования электрофизиологических сигналов в биотехнических системах реабилитационного типа / А. А. Трифонов, С. А. Филист, Е. В. Петрунина, А. А. Кузьмин, Р. И. Сафронов, Е. В. Крикунова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 3. С. 48-77.

4. Двухуровневая нейросетевая модель дешифратора электромиосигнала в системе управления вертикализацией экзоскелета / А. А. Трифонов, С. А. Филист, А. А. Кузьмин, В. В. Жилин, Е. В. Петрунина // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2020. № 4 (52). С. 99-111.

5. Томакова Р. А., Филист С. А., Дураков И. В. Программное обеспечение автоматической классификации рентгенограмм грудной клетки на основе гибридных классификаторов // Экология человека. 2018. № 6. С. 59-64.

6. 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.

7. Biotechnical system for control to the exoskeleton limb based on surface myosignals for rehabilitation complexes / A. A. Trifonov, A. A. Kuzmin, S. A. Filist, S. V. Degtyarev, E. V. Petrunina // 14th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT 2020 – Proceedings, 2020. P. 9368588.

8. Трифонов А. А., Кузьмин А. А., Павленко А. В. Беспроводная система регистрации сигналов электромиограммы для биотехнических систем реабилита-

ционного типа // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития: сборник трудов / Тамбовский государственный технический университет. Тамбов, 2021. С. 356-360.

9. Белобров А. П., Кузьмин А. А., Филист С. А. Многомерная частотная селекция в задачах анализа медленных волн // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. № 2. С. 4–10.

10. Предикторы синхронности системных ритмов живых систем для классификаторов их функциональных состояний / Т. В. Петрова, С. А. Филист, С. В. Дегтярев, А. В. Киселев, О. В. Шаталова // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2018. Т. 17, № 3. С. 693-700.

11. Classification of the functional state of the respiratory system based on the spectral analysis of the electrocardio signal / M. B. Myasnyankin, A. A. Kuzmin, S. A. Filist, L. V. Shulga // CEUR Workshop Proceedings / ITIDMS 2021 – Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems". Moscow, 2021.

12. Виртуальные потоки в гибридных решающих модулях классификации сложноструктурируемых 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.

13. Open G. L. The Industry's Foundation for High Performance Graphics. From Games To Virtual Reality, Mobile Phones To Supercomputers. URL: https://www.opengl.org/ (дата обращения: 01.05.2022).

14. Windows: Sleep(0.5). URL: https://habr.com/ru/post/319402/ (дата обращения: 01.05.2022).

15. Tomakova R. A., Filist S., Pykhtin A. Development and research of methods and algorithms for intelligent systems for complex structured images classification // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12, N 22. P. 6039-6041.

16. Рихтер Дж. Windows для профессионалов: создание эффективных Win32 приложений с учетом специфики 64-разрядной версии Windows. СПб.: Питер; М.: Русская Редакция, 2001. 752 с.

17. Томакова Р. А., Мухаммед А. А., Плесканос Л. В. Многоагентные системы классификации на основе нелинейных моделей импеданса в биоактивных точках // Биомедицинская радиоэлектроника. 2014. № 9. С. 51-55.

18. Техническая документация Майкрософт. URL: https://docs.microsoft.com/ru-ru/ (дата обращения: 01.05.2022).

19. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2015616286. Программа сингулярного анализа электрокардиосигнала / Р. А. Томакова, Яв Зар До, О. В. Шаталова, М. В. Томаков. № 2015612066; заявл. 23.03.15; опубл. 05.06.15.

20. Патент на изобретение RU 2504328 C1. Устройство для контроля анизотропии электрической проводимости биотканей / Томакова Р. А., Филист С. А., Кузьмин А. А., Кузьмина М. Н. и [др.]. № 2012128471/14; заявл. от 06.07.12; опубл. 20.01.14.

References

1. Myasnyankin M. B., Philist S. A., Kiselev A. V., Kuzmin A. A. Formirovaniye deskriptorov dlya klassifikatorov funktsional'nogo sostoyaniya sistemy dykhaniya na osnove spektral'nogo analiza elektrokardiosignala [Formation of descriptors for classifiers of the functional state of the respiratory system based on the spectral analysis of the electrocardiosignal]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoye priborostroyeniye = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2020, vol. 10, no. 3/4, pp. 8-28.

2. Kiselev A. V., Kuzmin A. A., Myasnyankin M. B., Maslak A. A., Philist S. A., Rybochkin A. F. Klassifikatsiya funktsional'nogo sostoyaniya sistemy dykhaniya na osnove analiza variabel'nosti medlennykh voln VLF-diapazona [Classification of the functional state of the respiratory system based on the analysis of the variability of slow waves in the VLF range]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoye priborostroyeniye = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2022, no. 1, vol. 12, pp. 8-32.

3. Trifonov A. A., Filist S. A., Petrunina E. V., Kuzmin A. A., Safronov R. I., Krikunova E. V. Metod i algoritmy dekodirovaniya elektrofiziologicheskikh signalov v biotekhnicheskikh sistemakh reabilitatsionnogo tipa [Method and algorithms for decoding electrophysiological signals in biotechnical systems of rehabilitation type]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoye priborostroyeniye = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 48-77.

4. Trifonov A. A., Filist S. A., Kuzmin A. A., Zhilin V. V., Petrunina E. V. Dvukhurovnevaya neyrosetevaya model' deshifratora elektromiosignala v sisteme upravleniya vertikalizatsiyey ekzoskeleta [Two-level neural network model of the electromyosignal decoder in the exoskeleton verticalization control system]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2020, no. 4 (52), pp. 99-111.

5. Tomakova R. A., Philist S. A., Fools I. V. Programmnoye obespecheniye avtomaticheskoy klassifikatsii rentgenogramm grudnoy kletki na osnove gibridnykh klassifikatorov [Software for automatic classification of chest radiographs based on hybrid classifiers]. *Ekologiya cheloveka = Human Ecology*, 2018, no. 6, pp. 59-64.

6. Filist S. A., Tomakova R. A., Yaa Z. D. Universal'nyye setevyye modeli dlya zadach klassifikatsii biomeditsinskikh dannykh [Universal network models for problems of classification of biomedical data]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4(43), pt. 2, pp. 44–50.

7. Trifonov A. A., Kuzmin A. A., Filist S. A., Degtyarev S. V., Petrunina E. V. Biotechnical system for control to the exoskeleton limb based on surface myosignals for rehabilitation complexes. 14th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT 2020 – Proceedings, 2020, p. 9368588.

8. Trifonov A. A., Kuzmin A. A., Pavlenko A. V. Besprovodnaya sistema registratsii signalov elektromiogrammy dlya biotekhnicheskikh sistem reabilitatsionnogo tipa [Wireless system for recording electromyogram signals for biotechnical systems of rehabilitation type]. *Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya. Sbornik trudov* [Radioelectronics. Problems and prospects of development. Collection of works]. Tambov, Tambov State Technical University Publ., 2021, pp. 356-360. (In Russ.)

9. Belobrov A. P., Kuzmin A. A., Philist S. A. Mnogomernaya chastotnaya selektsiya v zadachakh analiza medlennykh voln [Multidimensional frequency selection in problems of analysis of slow waves]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2010, no. 2, p. 4–10.

10. Petrova T. V., Philist S. A., Degtyarev S. V., Kiselev A. V., Shatalova O. V. Prediktory sinkhronnosti sistemnykh ritmov zhivykh sistem dlya klassifikatorov ikh funktsional'nykh sostoyaniy [Synchronicity predictors of systemic rhythms of living systems for classifiers of their functional states]. *Sistemnyy analiz i upravleniye v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2018, vol. 17, no. 3, pp. 693–700.

11. Myasnyankin M. B., Kuzmin A. A., Filist S. A., Shulga L. V. Classification of the functional state of the respiratory system based on the spectral analysis of the electrocardio signal. CEUR Workshop Proceedings. ITIDMS 2021 – Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems". Moscow, 2021.

12. Kiselev A. V., Savinov D. Yu., Filist S. A., Shatalova O. V., Zhilin V. V. Virtual'nyye potoki v gibridnykh reshayushchikh modulyakh klassifikatsii slozhnostrukturiruyemykh

dannykh [Virtual threads in hybrid decision modules for classifying complex data]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2018, no. 2 (42), pp. 137-149.

13. Open G. L. The Industry's Foundation for High Performance Graphics. From Games To Virtual Reality, Mobile Phones To Supercomputers. Available at: https://www.opengl.org/. (accessed 01.05.2022)

14. Windows: Sleep(0.5). Available at: https://habr.com/ru/post/319402/. (accessed 01.05.2022)

15. Tomakova R. A., Filist S., Pykhtin A. Development and research of methods and algorithms for intelligent systems for complex structured images classification. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12. no. 22, pp. 6039-6041.

16. Richter J. Windows dlya professionalov: sozdanie effektivnykh Win32 prilozhenii s uchetom spetsifiki 64-razryadnoi versii Windows [Windows for Professionals: Building Efficient Win32 Applications with 64-bit Windows in Mind]. St. Petersburg, Peter Publ., Moscow, Russian Edition Publ., 2001. 752 p.

17. Tomakova R. A., Mohammed A. A., Pleskanos L. V. Mnogoagentnye sistemy klassifikatsii na osnove nelineiinykh modelei impedansa v bioaktivnykh tochkakh [Multiagent classification systems based on nonlinear impedance models in bioactive points]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2014, no. 9, pp. 51-55.

18. Tekhnicheskaya dokumentatsiya Maikrosoft [Microsoft technical documentation]. Available at: https://docs.microsoft.com/ru-ru. (accessed 01.05.2022)

19. Tomakova R. A, Yaa Zar Do, Shatalova O. V., Tomakov M. V. Programma singulyarnogo analiza elektrokardiosignala [Program of singular electrocardiosignal analysis]. Certificate RF, no. 201561266, 2015.

20. Tomakova R. A., Filist S. A., Kuzmin A. A., Kuzmina M. N., eds. Ustroistvo dlya kontrolya anizotropii elektricheskoi provodimosti biotkanei [A device for controlling the anisotropy of electrical conductivity of biological tissues]. Patent RF, no. 2504328, 2014.

Информация об авторах / Information about the Authors

Кузьмин Александр Алексеевич, доктор технических наук, доцент кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ku3bmin@gmail.com

Alexander A. Kuzmin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ku3bmin@gmail.com

Мяснянкин Максим Борисович, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западного государственного университета, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: 79606039503@mail.ru

Маслак Анатолий Андреевич, доктор технических наук, профессор кафедры математики, информатики, естественно-научных и общетехнических дисциплин, Филиал Кубанского государственного университета в г. Славянске-на-Кубани, г. Славянск-на-Кубани, Российская Федерация, e-mail: anatoliy_maslak@mail.ru

Филист Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sfilist@gmail.com

Maksim B. Myasnyankin, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: 79606039503@mail.ru

Anatoly A. Maslak, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Mathematics, Computer Sciences, Natural Sciences and General Technical Disciplines, Branch of the "Kuban State University" in Slavyansk-on-Kuban, Slavyansk-on-Kuban, Russian Federation, e-mail: anatoliy_maslak@mail.ru

Sergey A. Filist, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sfilist@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-126-138

CC BY 4.0

Система электронной аускультации: модель построения электронного стетоскопа

А. О. Макалов[1], В. А. Смирнов[1], А. В. Прохорцов[1] ✉

[1] Тульский государственный университет
пр. Ленина 92, Тула 300012, Российская Федерация

✉ e-mail: proxav@rambler.ru

Цель исследования *– повышение разнообразия конструкций систем электронной аускультации с измеренными характеристиками и апробированием. Серия статей включает в себя разработку модели системы электронной аускультации, разработку конструкции электронного стетоскопа, изготовление экспериментального образца, разработку методики измерения амплитудно-частотных характеристик электронных и классических стетоскопов, апробирование предложенных моделей и методов, анализ аускультативных данных. В статье предложена модель построения систем электронной аускультации с целью расширения разнообразия технических средств электронной аускультации, предложен экспериментальный образец на основе предложенной модели.*

Методы. *Исследования базировались на отечественных публикациях и разработках в области электронной аускультации. Для повышения качества записываемых данных на основе классической головки стетоскопа разработана головка электронного стетоскопа, обеспечивающая высокую чувствительность к дыхательным шумам в широком диапазоне частот и в рабочем диапазоне частот равномерную АЧХ.*

Результаты. *На основе предложенной модели разработан экспериментальный образец системы электронной аускультации.*

Заключение. *Предложены модель системы электронной аускультации и конструкция головки электронного стетоскопа с широкой полосой пропускания. В дальнейшем требуется апробирование и измерение амплитудно-частотных характеристик системы электронной аускультации.*

Ключевые слова: *система электронной аускультации; электронный стетоскоп; средство аускультации.*

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

© Макалов А. О., Смирнов В. А., Прохорцов А. В., 2022

Для цитирования: Макалов А. О., Смирнов В. А., Прохорцов А. В. Система электронной аускультации: модель построения электронного стетоскопа // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 3. С. 126–138. https://doi.org/ 10.21869/2223-1536-2022-12-3-126-138.

Поступила в редакцию 20.06.2022 *Подписана в печать 26.07.2022* *Опубликована 30.09.2022*

Electronic Auscultation System: a Model for Building an Electronic Stethoscope

Alexey O. Makalov [1], Vladimir A. Smirnov [1], Alexey V. Prokhortsov [1] ✉

[1] Tula State University
92 Lenin Ave., Tula 300012, Russia, Russian Federation

✉ e-mail: proxav@rambler.ru

The purpose of research *is increasing the diversity of designs of electronic auscultation systems with measured characteristics and testing. A series of articles includes the development of a model of an electronic auscultation system, the development of an electronic stethoscope design, the manufacture of an experimental sample, the development of a method for measuring the amplitude-frequency characteristics of electronic and classical stethoscopes, testing the proposed models and methods, and analyzing auscultatory data. The article proposes a model for constructing electronic auscultation systems in order to expand the variety of technical means of electronic auscultation; an experimental sample is proposed based on the proposed model.*
Methods. *The research was based on domestic publications and developments in the field of electronic auscultation. To improve the quality of recorded data, based on the classic stethoscope head, an electronic stethoscope head has been developed that provides high sensitivity to breath sounds in a wide frequency range, providing a uniform frequency response in the operating frequency range.*
Results. *Based on the proposed model, an experimental sample of the electronic auscultation system was developed.*
Conclusion. *A model of an electronic auscultation system is proposed, and a design of an electronic stethoscope head with a wide bandwidth is proposed. In the future, testing and measurement of the amplitude-frequency characteristics of the electronic auscultation system is required.*

Keywords: *electronic auscultation system; electronic stethoscope; auscultation tool.*

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

For citation: Makalov A. O., Smirnov V. A., Prokhortsov A. V. Electronic Auscultation System: a Model for Building an Electronic Stethoscope. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022; 12(3): 126–138. (In Russ.) https://doi.org/ 10.21869/2223-1536-2022-12-3-126-138.

Received 20.06.2022 *Accepted 26.07.2022* *Published 30.09.2022*

***

Введение

Классическое выслушивание дыхательных шумов имеет недостатки, связанные с акустикой человеческого уха и конструкцией стетоскопов. При классической аускультации ухо врача воспринимает сигнал, формируемый грудной

клеткой пациента в зоне контакта с головкой стетоскопа, с искажениями, связанными с акустическими свойствами головки стетоскопа, с передаточной функцией гибкого звуковода, параметры которой зависят от его длины, толщины стенок, внутреннего диаметра и свойств материала звуковода. Гибкость стенок звуковода приводит к тому, что собственная частота системы «головка–звуковод–ухо» мала и может находиться в начале рабочего диапазона частот (50-100 Гц), в результате чего ожидаемо наблюдение явной интерференционной картины на приемной части системы. Также на объективность результатов аускультации оказывает влияние опыт врача. При этом в ходе диагностики данные респираторных звуков остаются безвозвратно утерянными, что не позволяет произвести анализ дыхательных шумов несколькими специалистами без участия пациента.

Исследования в области респираторной акустики являются перспективным направлением, позволяющим решить проблему объективизации дифференциальной диагностики респираторных заболеваний [1; 2; 3; 4]. Для экспериментальных исследований в данной области используются системы электронной аускультации. Данные системы предполагают использование электронных звукоснимателей (пьезо-, электретные и конденсаторные микрофоны), усилителей, звукозаписывающей и звуковоспроизводящей аппаратуры.

Несмотря на имеющийся уровень всех необходимых технических решений [5; 6; 7; 8; 9; 10], данная область развивается медленно и в практике врача электронный стетоскоп встречается редко. В [11; 12; 13; 14] определены основные проблемы развития электронных стетоскопов и требования к ним. Требуется большее разнообразие бюджетных конструкций и схемотехнических решений электронных систем аускультации для развития данной области. Помимо проблем разработки проблема развития данного вида приборов дополнительно обусловливается отсутствием методов контроля качества передачи звука.

Следует отметить избирательную направленность отечественных публикаций в области электронной аускультации: отсутствует серия публикаций, посвященных разработке средств электронной аускультации, измерению их выходных характеристик и апробированию. Также часто не раскрывается состав и конструкция устройства, используемого для записи аускультативных данных.

На основе вышеописанного предложена серия статей, в которой предложен подход к разработке систем электронной аускультации; конструкция прибора; метод измерения характеристик приборов электронной аускультации; экспериментальные результаты и методы обработки дыхательных звуков [15; 16; 17].

Материалы и методы

Для разработки системы электронной аускультации применялись следующие критерии:

1. Минимальная разрешающая способность оцифровки акустических данных – 16 бит.

2. Количество аудиоканалов – 2.

3. Частота дискретизации на канал – не менее 32 кГц.

4. Возможность регистрации и передачи данных на ПЭВМ.

5. Автономность устройства.

На рисунке 1 представлена общая структурная схема устройства.

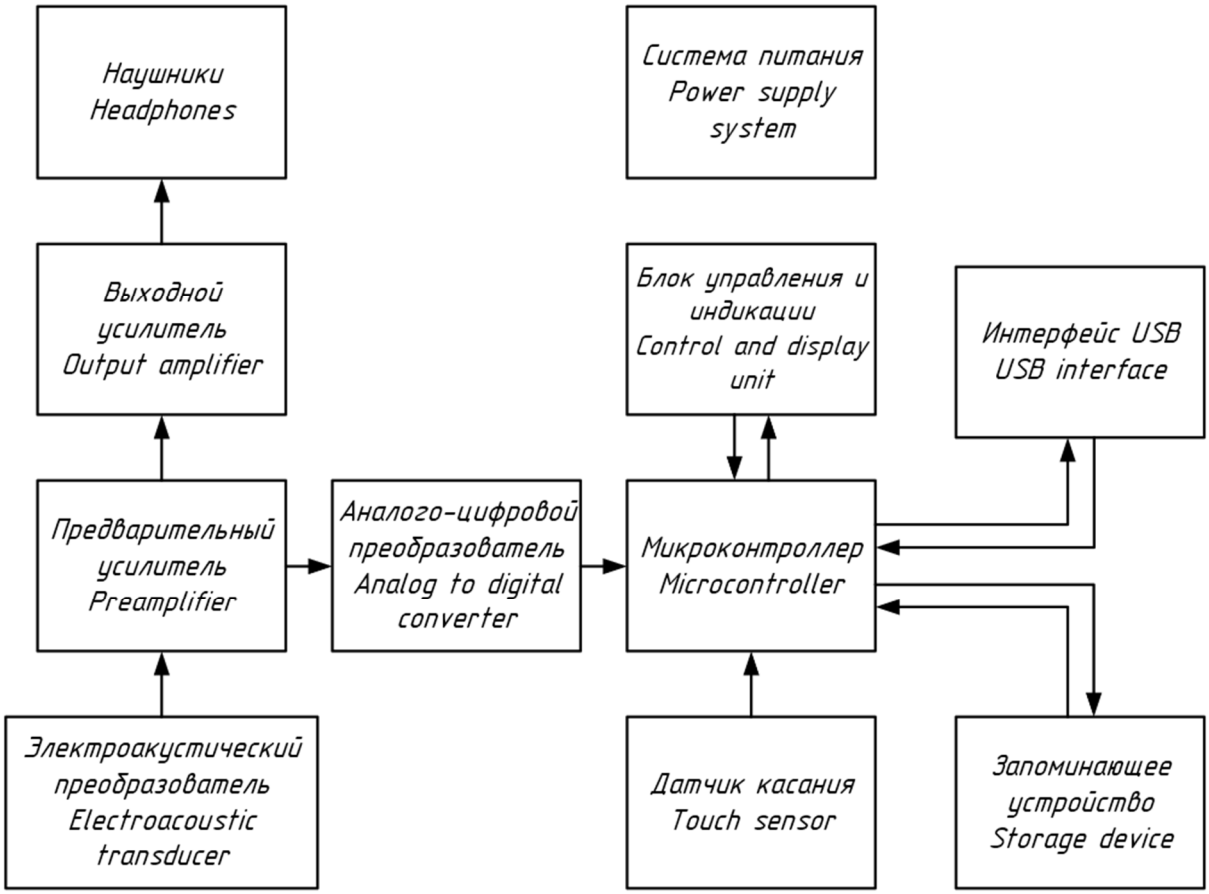


Рис. 1. Общая структурная схемы устройства

Fig. 1. General block diagram of the device

Съем акустического сигнала с грудной клетки производится электроакустическим преобразователем, расположенным в головке стетоскопа.

Уровень выходного сигнала электроакустического преобразователя очень мал (10…100 мВ) для его преобразования в цифровую форму. Усиление входного сигнала производится предварительным усилителем. Прослушивание аускультативных шумов производится при помощи наушников. Большинство

современных наушников имеют сопротивление в диапазоне от 8 до 32 Ом. Для управления низкоомной нагрузкой в виде наушников применяется выходной усилитель.

АЦП производит оцифровку сигнала и передает оцифрованный сигнал на микроконтроллер. Запись аускультативных данных на запоминающее устройство выполняется микроконтроллером. Отображение информации и управление записью производятся блоком управления и индикации. Интерфейс USB требуется для обмена информацией между устройством и ПЭВМ.

В качестве электроакустического преобразователя выбран капсюль электретного конденсаторного микрофона. Данные капсюли имеют низкую стоимость и малое напряжение питания (3В…5В), что упрощает их сопряжение с микроконтроллером. Для выбора капсюля электретного конденсаторного микрофона определены следующие параметры:

1. Номинальный диапазон частот: $f_{ном}$ = 20 Гц … 16 кГц.

2. Чувствительность: $L = 15 \ldots 70 \ \frac{мВ}{Па}$.

3. Неравномерность АЧХ: $\Delta L = \pm 3$ дБ.

4. Диаграмма направленности – круговая.

В качестве датчика касания использован микропереключатель, достоинством которого являются стоимость и простота подключения.

Для задачи оцифровки аудиоданных разработаны специализированные интегральные микросхемы аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Они имеют в своём составе последовательный аудиоинтерфейс передачи данных (I2S/PCM/PDM/LJ), позволяющий передавать данные непрерывно. В данной разработке использован аудиоАЦП PCM1808, обладающий следующими характеристиками:

1. Конфигурируемая частота дискретизации – 8 кГц/16 кГц/32 кГц/44,1 кГц/48 кГц/96 кГц.

2. Разрядность – 24 бит.

3. Количество каналов – 2.

4. Интерфейс обмена данными – I2S.

5. Напряжение питания цифровой части – 3,3 В.

6. Напряжение питания аналоговой части – 5 В.

7. Максимальный размах входного сигнала – 3 В.

Также для решения задачи оцифровки и одновременного воспроизведения входного сигнала могут использоваться интегральные микросхемы аудиокодеков, которые содержат в своём составе аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи, например ADAU1761 или TLV320AIC3204.

В качестве запоминающего устройства использована карта памяти формата microSD скоростного класса C4 типа SDSC объемом 4 Гб. Карты памяти данного класса поддерживают запись со скоростью 4 МБ/с.

В современных портативных устройствах блок управления и индикации представляет собой независимое устройство, которое подключается к центральному микропроцессору. В качестве элемента управления и индикации используется бюджетный дисплейный модуль Nextion NX8048K050, который имеет в своем составе резистивную сенсорную панель. Передача сигналов управления производится на микроконтроллер по интерфейсу UART [18; 19; 20].

Для решения задач записи и обработки аускультативных данных используется микроконтроллер STM32F407VGT. Следует отметить, что для записи на запоминающее устройство формата microSD аускультативных данных с частотой дискретизации 48 кГц и разрешающей способностью 24 бит требуется микроконтроллер, имеющий в своём составе не менее 128 кБ ОЗУ.

Для решения требования к автономности и портативности устройства в качестве источника питания используются аккумуляторы Li-ion. Рассмотрим структурную схему системы (рис. 2).

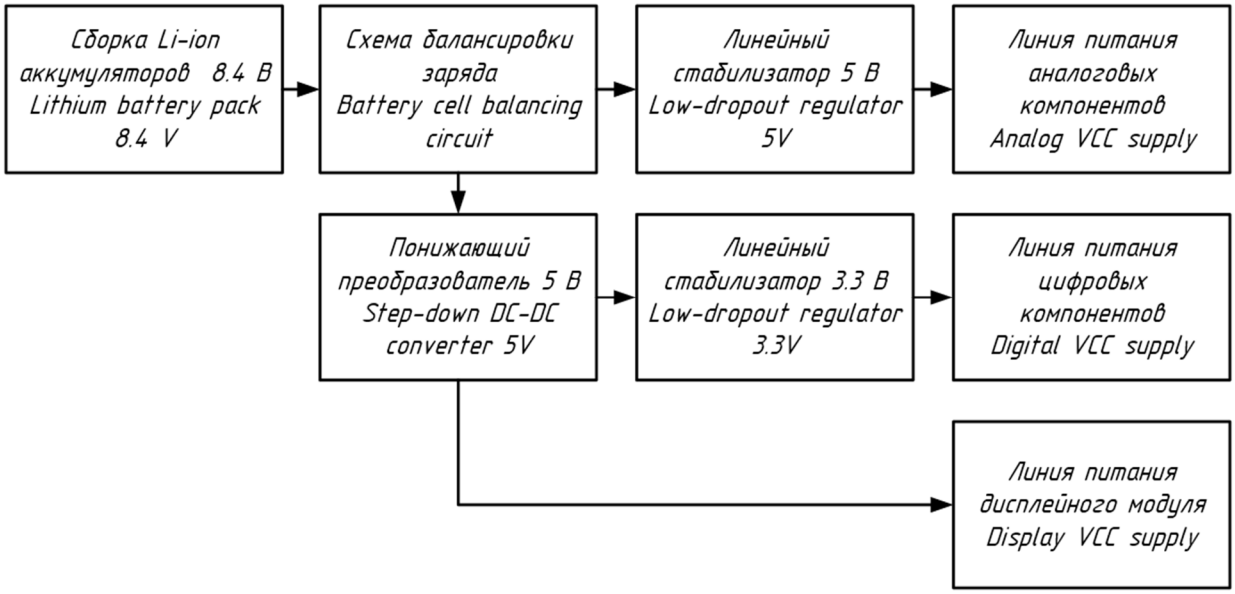


Рис. 2. Структурная схема подсистемы питания

Fig. 2. Structural diagram of the power subsystem

Так как для питания всего устройства используется сборка, состоящая из двух последовательно включенных Li-ion аккумуляторов, требуется балансировка их заряда. В разработанном устройстве используется активный метод балансировки заряда и выбрана микросхема ETA3000.

Для питания аналоговых и цифровых компонентов требуется незначительный ток – не более 120 мА и 300 мА

соответственно. В соответствии с этим линии питания аналоговых и цифровых компонентов построены на линейных стабилизаторах напряжения. Преимущество использования линейного стабилизатора заключается в низком уровне высокочастотных помех и малом количестве компонентов. Для питания линейного стабилизатора линии цифрового питания и дисплейного модуля используется понижающий преобразователь, построенный на микросхеме LM22675.

Ключевым элементом системы электронной аускультации является модуль акустического преобразователя, объединяющий электретный микрофон, головку стетоскопа и датчик касания. Преобразователь должен обеспечивать высокую чувствительность к дыхательным шумам в заданном диапазоне частот, обеспечивать в рабочем диапазоне частот равномерную АЧХ, но в то же время исключать влияние внешних шумов. Модуль акустического преобразователя разработан на основе головки классического стетоскопа (рис. 3) и включает в себя электретный микрофон, датчик касания и саму головку.

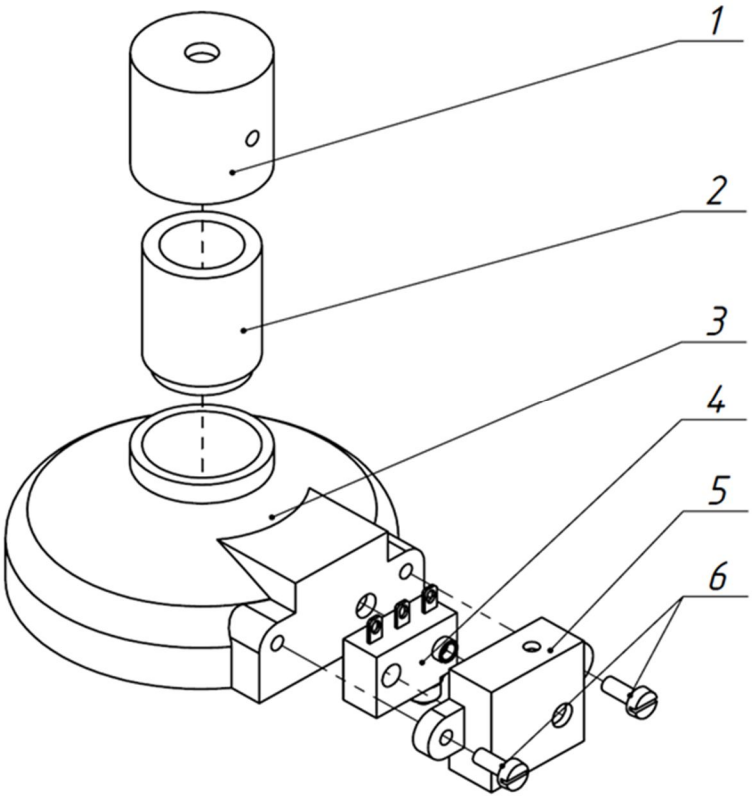


Рис. 3. Конструкция модуля акустического преобразователя электронного стетоскопа: 1 – крышка держателя микрофонного капсюля; 2 – держатель микрофонного капсюля; 3 – камера; 4 – микропереключатель G306-150S00; 5 – крышка микропереключателя; 6 – винты М2х5 ГОСТ Р ИСО 1207-2013

Fig. 3. The design of the acoustic transducer module of an electronic stethoscope: 1 – cover of the microphone capsule holder; 2 – microphone capsule holder; 3 – camera; 4 – microswitch G306-150S00; 5 – microswitch cover; 6 – M2x5 screws GOST R ISO 1207-2013

В акустической камере головки электронного стетоскопа имеется сквозное отверстие диаметром 0,6 мм для выравнивания давления внутри. В качестве материала мембраны используется полиэтилентерефталатная (ПЭТ) пленка толщиной 20 мкм. Следует отметить, что АЧХ электронной головки стетоскопа будет изменяться в зависимости от силы натяжения используемой мембраны.

Результаты и их обсуждение

На основе предложенной модели построен экспериментальный образец системы электронной аускультации. Рассмотрим внешний вид экспериментального образца (рис. 4).

Рис. 4. Экспериментальный образец системы электронной аускультации

Fig. 4. Experimental sample of the electronic auscultation system

Экспериментальный образец обладает следующими характеристиками:

1. Рабочий диапазон частот аналоговой части: 20 Гц – 20 кГц.
2. Аудиовыход – 32 Ом, 300 мВт.
3. Разрешающая способность – 24 бит.
4. Переключаемая частота дискретизации – 8/16/32/48 кГц.
5. Запоминающее устройство – microSD.
6. Поддержка SD-карт объемом – 512 Мб – 32 Гб.
7. Поддержка файловой системы FAT32.
8. Формат записи – WAV.
9. Автоматическое определение касания головки электронного стетоскопа.
10. Автоотключение и регулировка яркости подсветки.
11. Емкость аккумуляторной батареи – 3000 мА·ч.
12. Минимальное время работы от одного заряда батареи – 4,5 ч.
13. Интерфейс USB для передачи данных на ПЭВМ.

Из конструкционных недостатков экспериментального образца можно выделить его габариты. Достоинствами являются возможность хранения и пере-

дачи данных на ПЭВМ, а также автоматическое исключение звуков, не несущих информации в момент переноса головки стетоскопа с одной точки аускультации на другую, за счёт детектирования касания головки стетоскопа тела человека.

Выводы

Предложены подход к разработке устройств электронной аускультации, конструкция акустического преобразователя стетоскопа, подход к выбору функциональной структуры системы электронной аускультации.

Список литературы

1. Silverman B., Balk M. Digital Stethoscope – Improved Auscultation at the Bedside // The American Journal of Cardiology. 2019. Vol. 123, is. 6. P. 984-985.

2. Рыбочкин А. Ф., Калугина Н. М. Методы и средства анализа акустических шумов легких человека // Научный вестник. 2016. № 2. С. 50-62.

3. Сафронова М. А., Ширяев А. Д., Коренбаум В. И. Анализ гармоник свистящих звуков в шумах форсированного выдоха человека // Акустический журнал. 2021. Т. 67, № 4. С. 454-464. https://doi.org/10.31857/S0320791921040122.

4. Stethoscope Acoustics. The Doctor and His Stethoscope / Ertel Paul Y. [et al.]. Waltham: Circulation, 1966. Vol. 34. P. 889-898.

5. Madrid. Non-invasive devices for respiratory sound monitoring / A. Troncoso, J. A. Ortega, R. Seepold, N. Martínez // Procedia Computer Science. 2021. Vol. 192. P. 3040-3048.

6. Исаков Р. В., Алексеева И. И. Биотехническая система регистрации виброакустических сигналов человека // Биотехносфера. 2017. № 5(53). С. 28-31.

7. Патент 188636 Российская Федерация. Устройство для преобразования механического стетофонендоскопа в электронный / Малинин С. В., Фурман Е. Г. Опубл. 18.04.19, Бюл. № 11. 4 с.

8. Патент 182368 Российская Федерация. Электронный стетоскоп / Усков А. И., Ямпольский И. И. Опубл. 15.08.18, Бюл. № 23. 8 с.

9. Патент 2644546 Российская Федерация. Электронный медицинский стетоскоп / Борисов Е. Г., Борисова Л. И., Семенов А. Г. Опубл. 12.02.18, Бюл. № 5.

10. Федотов А. А., Акулов С. А. Измерительные преобразователи биомедицин-ских сигналов систем клинического мониторинга. М.: Радио и связь, 2013. 250 с.

11. Степанов Д. А. Электронный стетоскоп: адаптация концепции под российские социально-экономические реалии // Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения: труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 19-21 ноября 2015 г.: в 2 ч. / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. СПб., 2015. С. 413-415.

12. Гончарук М. Е. Электронный стетоскоп. Проблемы электронной аускультации // Наука, техника, промышленное производство: история, современное состояние, перспективы: материалы региональной научно-практической конференции студентов и аспирантов, Владивосток, 08–28 декабря 2020 года / Дальневосточный федеральный университет. Владивосток, 2021. С. 341-344.

13. Макалов А. О., Соболенкова В. С., Смирнов В. А. Проблемы и задачи в области электронной аускультации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 6. С. 45–50.

14. Биомедицинские сигналы и изображения в цифровом здравоохранении: хранение, обработка и анализ / В. С. Кубланов, А. Ю. Долганов, В. Б. Костоусов [и др.]; под общ. ред. В. С. Кубланова. Екатеринбург: Издательство Уральского университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2020. 240 с.

15. Nowak L. J., Nowak K. M. An experimental study on the role and function of the diaphragm in modern acoustic stethoscopes // Applied Acoustics. 2019. Vol. 155. P. 24-31.

16. Polat H., Güler I. A simple computer-based measurement and analysis system of pulmonary auscultation sounds // J. Med. Syst. 2004. N 28(6). P. 665-672. https://doi.org/10.1023/b:joms.0000044968.45013.ce.

17. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. C. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 3rd ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1994.

18. Кубланов В. С., Борисов В. И., Долганов А. Ю. Анализ биомедицинских сигналов в среде MATLAB. Екатеринбург: Издательство Уральского университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2016. 120 с.

19. Changes in the breath sound spectrum with bronchodilation in children with asthma / Mariko Nukaga, Hideyuki Tabata, Mayumi Enseki, Kota Hirai, Hiroyuki Furuya, Masahiko Kato, Hiroyuki Mochizuki // Respiratory Investigation. 2018. Vol. 56, is. 5. P. 392-398.

20. Злобин Д. В. Методика и устройство для измерения амплитудно-частотных характеристик датчиков электронной аускультации // Вестник ИжГТУ. 2012. № 4. С. 110-115.

References

1. Silverman B., Balk M. Digital Stethoscope – Improved Auscultation at the Bedside. *The American Journal of Cardiology*, 2019, vol. 123, is. 6, pp. 984-985.

2. Rybochkin A. F., Kalugina N. M. Metody i sredstva analiza akusticheskikh shumov legkikh cheloveka [Methods and means of analyzing acoustic noises of human lungs]. *Nauchnyi vestnik = Scientific Bulletin*, 2016, no. 2, pp. 50-62.

3. Safronova M. A., Shiryaev A. D., Korenbaum V. I. Analiz garmonik svistyashchikh zvukov v shumakh forsirovannogo vydokha cheloveka [Analysis of the harmonics of whistling sounds in human forced expiration noises]. *Akusticheskii zhurnal = Acoustic Magazine*, 2021, vol. 67, no. 4, pp. 454-464. https://doi.org/10.31857/S0320791921040122.

4. Ertel Paul Y., eds. Stethoscope Acoustics. The Doctor and His Stethoscope. Waltham, Circulation, 1966, vol. 34, pp. 889-898.

5. Troncoso A., Ortega J. A., Seepold R., Martínez N. Madrid. Non-invasive devices for respiratory sound monitoring. *Procedia Computer Science*, 2021, vol. 192, pp. 3040-3048.

6. Isakov R. V., Alekseeva I. I. Biotekhnicheskaya sistema registratsii vibroakustich-eskikh signalov cheloveka [Biotechnical system for recording human vibroacoustic signals]. *Biotekhnosfera = Biotechnosphere*, 2017, no. 5 (53), pp. 28-31.

7. Malinin S. V., Furman E. G. Ustroistvo dlya preobrazovaniya mekhanicheskogo ste-tofonendoskopa v elektronnyi [A device for converting a mechanical stethophonendoscope into an electronic one]. Patent RF, no. 188636, 2019.

8. Uskov A. I., Yampolsky I. I. Elektronnyi stetoskop [Electronic stethoscope]. Patent RF, no. 182368, 2018.

9. Borisov E. G., Borisova L. I., Semenov A. G. Elektronnyi meditsinskii stetoskop [Elec-tronic medical stethoscope]. Patent RF, no. 2644546, 2018.

10. Fedotov A. A., Akulov S. A. Izmeritel'nye preobrazovateli biomeditsinskikh signalov sistem klinicheskogo monitoring [Measuring transducers of biomedical signals of clinical monitoring systems]. Moscow, Radio and communication Publ., 2013. 250 p.

11. Stepanov D. A. [Electronic stethoscope: adaptation of the concept to Russian socio-economic realities]. *Zdorov'e – osnova chelovecheskogo potentsiala: problemy i puti ikh resh-eniya. Trudy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Sankt-Peterburg, 19-21 noyabrya 2015 g*. [Health is the basis of human potential: problems and ways to solve them. Proceedings of the 10th All-Russian Scientific and Practical Confer-ence with International Participation, St. Petersburg, November 19-21, 2015]. St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2015, pp. 413-415. (In Russ.)

12. Goncharuk M. E. [Electronic stethoscope. Problems of electronic auscultation]. Nauka, tekhnika, promyshlennoe proizvodstvo: istoriya, sovremennoe sostoyanie, perspek-tivy. Materialy regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov i aspirantov, Vladi-vostok, 08–28 dekabrya 2020 goda [Science, technology, industrial production: history, cur-rent state, prospects. Proceedings of the regional scientific and practical conference of students and graduate students, Vladivostok, December 08–28, 2020]. Vladivostok, Far Eastern Federal University Publ., 2021, pp. 341-344. (In Russ.)

13. Makalov A. O., Sobolenkova V. S., Smirnov V. A. Problemy i zadachi v oblasti el-ektronnoi auskul'tatsii [Problems and tasks in the field of electronic auscultation]. *Izvestiya*

Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of the Tula State University. Engineering Sciences, 2020, vol. 6, pp. 45–50.

14. Kublanov V. S., Dolganov A. Yu., Kostousov V. B., eds. Biomeditsinskie signaly i izobrazheniya v tsifrovom zdravookhranenii: khranenie, obrabotka i analiz [Biomedical signals and images in digital health care: storage, processing and analysis]; ed. by V. S. Kublanova. Yekaterinburg, Ural Federal University named after the First of Russia B. N. Yeltsin Publ., 2020. 240 p.

15. Nowak L. J., Nowak K. M. An experimental study on the role and function of the diaphragm in modern acoustic stethoscopes. *Applied Acoustics*, 2019, vol. 155, pp. 24-31.

16. Polat H., Güler I. A simple computer-based measurement and analysis system of pulmonary auscultation sounds. *J. Med. Syst.,* 2004, no. 28(6), pp. 665-672. https://doi.org/10.1023/b:joms.0000044968.45013.ce

17. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. C. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 3rd ed. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1994.

18. Kublanov V. S., Borisov V. I., Dolganov A. Yu. Analiz biomeditsinskikh signalov v srede MATLAB [Analysis of biomedical signals in the MATLAB environment: a tutorial]. Yekaterinburg, Ural Federal University named after the First of Russia B. N. Yeltsin Publ., 2016. 120 p.

19. Mariko Nukaga, Hideyuki Tabata, Mayumi Enseki, Kota Hirai, Hiroyuki Furuya, Masahiko Kato, Hiroyuki Mochizuki. Changes in the breath sound spectrum with bronchodilation in children with asthma. *Respiratory Investigation*, 2018, vol. 56, is. 5, pp. 392-398.

20. Zlobin D. V. Metodika i ustroistvo dlya izmereniya amplitudno-chastotnykh kharakteristik datchikov elektronnoi auskul'tatsii [Method and device for measuring the amplitude-frequency characteristics of electronic auscultation sensors]. *Vestnik IzhGTU = Bulletin of IzhGTU*, 2012, no. 4, pp. 110-115.

Информация об авторах / Information about the Authors

Макалов Алексей Олегович, аспирант, ассистент кафедры приборов и биотехнических систем, Институт высокоточных систем им. В. П. Грязева, Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация, e-mail: alex.makalu@outlook.com

Alexey O. Makalov, Post-Graduate Student, Assistant of the Department of Devices and Biotechnical Systems, Institute of High-Precision Systems named after V. P. Gryazev, Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: alex.makalu@outlook.com

Смирнов Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры приборов и биотехнических систем, Институт высокоточных систем им. В. П. Грязева, Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация, e-mail: veld071@rambler.ru

Vladimir A. Smirnov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Devices and Biotechnical Systems, Institute of High-Precision Systems named after V. P. Gryazev, Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: veld071@rambler.ru

Прохорцов Алексей Вячеславович, доктор технических наук, доцент кафедры приборов и биотехнических систем, Институт высокоточных систем им. В. П. Грязева, Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация, e-mail: proxav@rambler.ru

Alexey V. Prokhortsov, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Devices and Biotechnical Systems, Institute of High-Precision Systems named after V. P. Gryazev, Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: proxav@rambler.ru

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-139-157

CC BY 4.0

Моделирование размещения волоконно-оптической транспортной линии связи Курск – Железногорск

Р. А. Томакова[1] ✉, С. В. Комаренко[1], Д. А. Степанов[1]

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

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Резюме

Цель исследования *заключается в разработке моделей размещения волоконно-оптической транспортной линии связи в процессе мониторинга функционального состояния особенностей населенных пунктов прокладываемой трассы.*

Методы*. Рассмотрены особенности функционирования и реализации волоконно-оптического соединения применительно к транспортной лини связи Курск – Железногорск. Обозначены цели проведения исследований, в качестве базовой версии рассматривается модель, в которой проанализированы вопросы реализации технологий передачи данных и их практического использования, а также произведена оценка экономической эффективности волоконно-оптической линии связи (ВОЛС). В работе выделяются ключевые направления для обоснования состава и параметров модели, обозначаются принципы формирования значимых исходных данных, а также обсуждаются некоторые важные аспекты учета местности. Отмечены факторы, влияющие на выбор архитектуры построения транспортной линии связи, организация топологии SDH «точка – точка» транспортной ВОЛС между городами посредством применения синхронных линейных мультиплексоров SLM.*

Результаты. *В процессе моделирования размещений волоконно-оптической транспортной линии связи предложена: архитектура, топология, моделирование ВОЛС; выбор трассы для определённых участков ВОЛС с использованием географических особенностей местности при моделировании волоконно-оптической линии связи на участке Курск – Железногорск; способы передачи услуг связи абонентам сети; использование услуг Triple Pay от ПАО «Ростелеком»; операторы мультисервисной сети широкополосного IP-подключения; выполнен анализ требований к организации ВОЛС и расчет параметров линии связи.*

Заключение. *В процессе проведенного исследования были разработаны основные требования при выборе и прокладке ВОК с учетом географических особенностей местности при моделировании волоконно-оптической линии связи на участке Курск – Железногорск, произведен расчет характеристик сети и параметров линии связи, а также определены операторы мультисервисной сети широкополосного IP-подключения.*

Ключевые слова: *ВОЛС; SDH- и DWDM-технологии; xDSL- и Ethernet- технологии; ВОК; оптическое волокно; участок регенерации; оптический кабель; трасса.*

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

© Томакова Р. А., Комаренко С. В., Степанов Д. А., 2022

Для цитирования: Томакова Р. А., Комаренко С. В., Степанов Д. А. Моделирование размещения волоконно-оптической транспортной линии связи Курск – Железногорск // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 3. С. 139–157. https://doi.org/10.21869/ 2223-1536-2022-12-3-139-157.

Поступила в редакцию 05.06.2022 *Подписана в печать 02.07.2022* *Опубликована 30.09.2022*

Features of Construction (Modeling) of a Fiber-Optical Transport Line Kursk – Zheleznogorsk

Rimma A. Tomakova[1] ✉, Sergey V. Komarenko[1], Dmitry A. Stepanov[1]

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

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Abstract

The purpose of research *is to develop models for the placement of a fiber-optic transport communication line in the process of monitoring the functional state of the features of the settlements of the route being laid.*

Methods. *The features of the functioning and implementation of the fiber-optic connection in relation to the Kursk-Zheleznogorsk transport line are considered. The objectives of the research are outlined, a model is considered as a basic version, in which the issues of the implementation of data transmission technologies and their practical use are analyzed, as well as an assessment of the economic efficiency of a fiber-optic communication line (fiber optic line) is made. The paper highlights the key areas for substantiating the composition and parameters of the model, outlines the principles of forming meaningful input data, and discusses some important aspects of terrain accounting. The factors influencing the choice of architecture for the construction of a transport communication line, the organization of the SDH "point–to-point" topology of the transport network between cities through the use of synchronous linear multiplexers SLM are noted.*

Results. *In the process of modeling the placement of fiber-optic transport communication line, the following are proposed: architecture, topology, modeling of the fiber-optic communication line; the choice of a route for certain sections of the fiber-optic communication line using geographical features of the terrain when modeling a fiber-optic communication line on the Kursk-Zheleznogorsk section; methods of transmitting communication services to subscribers of the network; the use of Triple Pay services from Rostelecom PJSC; operators of a multiservice broadband IP connection network; the analysis of the requirements for the organization of the fiber optic network and the calculation of the parameters of the communication line.*

Conclusion. *In the course of the conducted research, the basic requirements were developed for the selection and laying of a VOC taking into account the geographical features of the terrain when modeling a fiber-optic communication line on the Kursk –Zheleznogorsk section, the network characteristics and parameters of the communication line were calculated, and the operators of a multiservice broadband IP connection network were identified.*

Keywords: *FOCL; SDH and DWDM technologies; xDSL and Ethernet technologies; FOC; optical fiber; regeneration section; optical cable; route.*

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

For citation: Tomakova R. A., Komarenko S. V., Stepanov D. A. Features of Construction (Modeling) of a Fiber-Optical Transport Line Kursk-Zheleznogorsk. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2022; 12(3): 139–157. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-139-157.

Received 05.06.2022 *Accepted 02.07.2022* *Published 30.09.2022*

Введение

Волоконно-оптические соединения используются для передачи данных начиная с 1970-х годов. Однако в настоящее время наблюдается значительный прорыв в применяемых технологиях как для передачи данных, так и для производства волоконно-оптического оборудования, которые претерпели значительные изменения за последние годы [1; 2; 3; 4].

Наиболее распространенными областями применения волоконно-оптических соединений помимо телекоммуникаций, где потоки данных, закодированные в виде световых сигналов, передаются на расстояния при отсутствии помех, в настоящее время являются, например, самолетостроение, медицинская или промышленная эндоскопия, экологический мониторинг, осветительные приборы различного назначения и др. [5; 6; 7; 8].

Волоконно-оптический кабель может передавать сигнал на большие расстояния с очень низким затуханием. Чтобы медный кабель с витой парой мог передавать сигнал на то же расстояние, сигнал по пути должен быть усилен в нескольких местах. Это можно было бы сделать с помощью так называемых ретрансляторов, но они довольно дороги. Вот почему волоконно-оптические кабели могут быть экономичным решением на больших расстояниях, даже несмотря на то, что стоимость 1 м оптоволокна существенно превышает стоимость медного кабеля [9; 10; 11]. Экономическая эффективность волоконно-оптических кабелей также обусловлена гибкостью волокон, то есть в кабель заданного диаметра может быть объединено больше волокон [12; 13; 14]. Это позволяет передавать больше данных по одной линии связи и делает их идеальными для передачи цифровой информации. В зависимости от типа используемых ВОК скорость передачи данных в линиях ВОЛС может достигать 10 000 Мбит/с. Превосходные характеристики передачи волоконно-оптического кабеля снижают потребность в дорогостоящих усилителях сигнала на пути и позволяют передавать колоссальные потоки данных, а магистрали с линиями ВОЛС покрывают практически все территории развитых государств [15; 16; 17].

Таким образом, актуальной является задача организации волоконно-оптической линии связи между городами Курск и Железногорск.

Материалы и методы

На выбор архитектуры построения ВОЛС оказывает влияние совокупность нескольких факторов, таких как: количество потенциальных пользователей; месторасположение главной станции; особенности населенного пункта; набор требований, выдвигаемых к прямому и обратному каналу; объем и номенклатура услуг и т. д.

Для проектирования ВОЛС нескольких оптических узлов следует применять архитектуру типа «линия». Предложенный тип архитектуры предполагает организации по установке делителей оптической мощности вдоль магистрали ВОЛС [18; 19]. Размещение оптических делителей производится в местах соединения оптического кабеля, проводимого из отдаленных участков к основной магистрали.

Места ответвлений от магистрального кабеля требуют установки оборудования ответвителей с неравномерным распределением мощности. Установка ответвителей производится в муфтах или кроссах. Каждый новый канал требует одной жилы ОК. Организация обратного канала требует соответствия количества жил оптического кабеля числу предполагаемых оптических приемников [20; 21].

Два телекоммуникационных узла, непосредственно связанных между собой, и их объединяющий участок сети представляют собой базовую топологию сети SDH «точка – точка». Применение такой конфигурации обусловило возникновение таких понятий, как однопролетная линия передачи» и локальная технологическая станция (СЛТ) [13; 19].

Топология «точка-точка» организуется посредством синхронных линейных мультиплексоров SLM, которые могут функционировать согласно схеме без резервирования (так называемый незащищенный режим) СЛТ, представленной ниже (рис. 1).

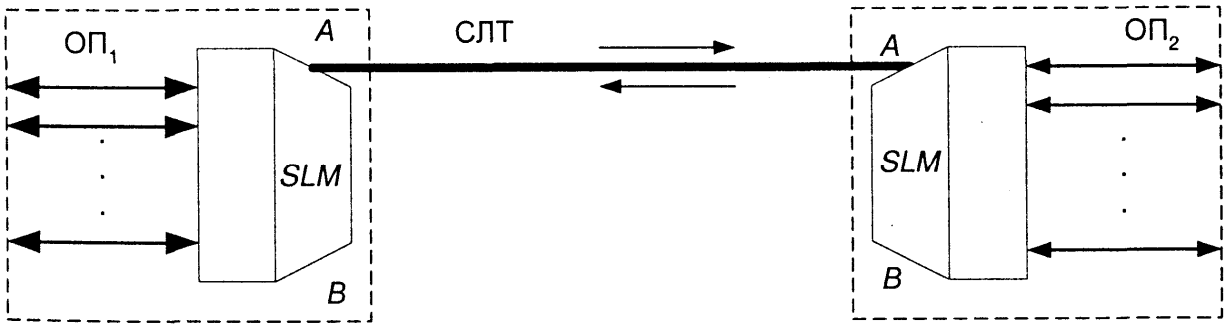


Рис. 1. Схема без резервирования

Fig. 1. Scheme without redundancy

С целью повышения надежности СЛТ возможно использование схемы со стопроцентным резервированием или с системой защиты типа «1+1» (рис. 2). При этом мультиплексоры SLM могут применяться различного уровня иерархии.

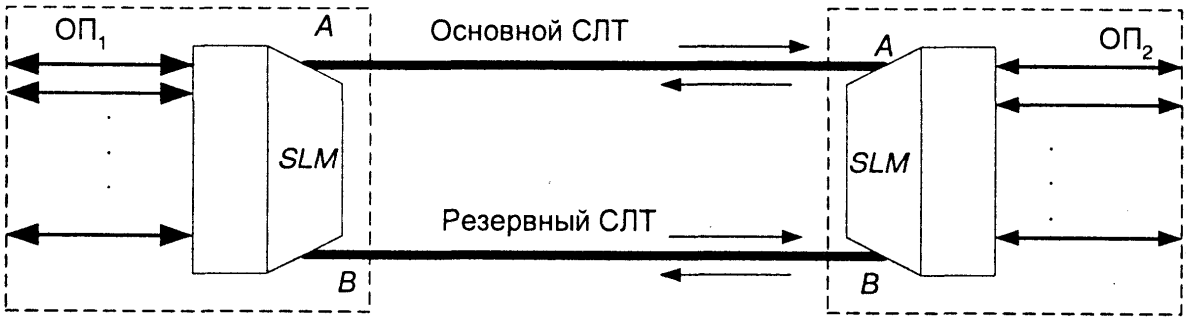


Рис. 2. Схема с системой защиты типа «1+1»

Fig. 2. A diagram with a "1+1" type protection system

В СЛТ с системой защиты типа «1+1» используются оба линейных или так называемых агрегатных порта (Пер, Пр) линейных блоков А и В, которые позволяют образовать основной и резервный СЛТ. Для построения указанных СЛТ прокладываются два кабеля по географически разнесенным трассам.

С выходов линейных блоков А и В оптические ЦЛС между двумя пунктами передаются по обоим СЛТ одновременно, а в пункте приема осуществляется выбор «лучшего» принятого сигнала. Резервирование СЛТ с системой защиты типа «1+1» в сетях SDH является их внутренней особенностью и не имеет ничего общего с внешним резервированием, когда используется альтернативный (резервный) путь от одного пункта сети к другому.

Несмотря на свою простоту, топология «точка-точка» наиболее широко используется при транспортировании больших потоков информации по высокоскоростным СЛТ на значительные расстояния.

Эту же топологию применяют в случае настройки участков сети при переходе к новой более высокой скорости передачи сигналов при использовании технологии SDH, например, от скорости передачи 622,08 Мбит/с к 2488,32 Мбит/с или от 2,5 к 10 Гбит/с [9].

Результаты и их обсуждение

Проведенный анализ существующих сетей связи выбора трассы ВОЛС позволил сформулировать требования к формированию исходных данных для организации транспортной волоконно-оптической линии связи населенных пунктов:

– г. Курск – областной центр;

– г. Железногорск, Курской области.

Как известно, в России крупнейшие частные федеральные операторы практически монополизировали рынок магистральных сетей. Они строят самые обширные линии связи, прокладываемые вдоль автомобильных трасс), а затем продают местным провайдерам право на их использование. Правительством РФ перед данными операторами поставлены задачи обязательно присутствовать в населенных пунктах с населением от 8 тысяч человек. Ниже перечислены топ-5 крупнейших операторов магистральной связи в России:

– ПАО «Ростелеком» – 500 тыс. км автомобильных дорог;

– компания «МегаФон» – 118 тыс. км автомобильных дорог;

– МТС – 117 тыс. км автомобильных дорог;

– ПАО «ВымпелКом» – 137 км автомобильных дорог;

– АО «ТрансТелеКом» (ТТК) – 76 тыс. км автомобильных дорог.

Основу таких магистралей составляют волоконно-оптические и радиорелейные системы передачи с технологическими решениями PDH, SDH, OTN. Эти магистрали применяются для соединения не только национальных узлов связей, но и международных. Изначально при проектировании таких сетей были решены задачи согласования сетей связи разных операторов. Это достигнуто благодаря международным стандартам.

ПАО «Ростелеком» – основной оператор телекоммуникационных сетей в Центрально-Черноземном экономическом регионе нашей страны. ПАО «Ростелеком» обладает собственной мощной магистральной сетью связи протяженностью около 500 тыс. км, построенной на основе ВОЛС с использованием SDH- и DWDM-технологий, а также местные сети протяженностью свыше 2,6 млн км, которые обеспечивают полное покрытие территории Российской Федерации и передачу любого типа информации: голоса, данных, видео.

С целью оптимизации сети выделим основные характеристики:

– наличие магистральных линий связи, соединенных через транзитные междугородные и международные узлы связи (ТМгУС и ТМнУС) с сетями национальных и зарубежных операторов;

– использование возможностей современных SDH- и DWDM-технологий.

Анализ географического положения г. Железногорска, а также карты покрытия ВОЛС ПАО «Ростелеком» (рис. 3) позволят сделать вывод о том, что через город Железногорск не проходит ни одной транспортной линии ВОЛС, позволяющей связать узлы Курска и Железногорска. Ближайшая же магистраль проложена через другую область – город Орел.

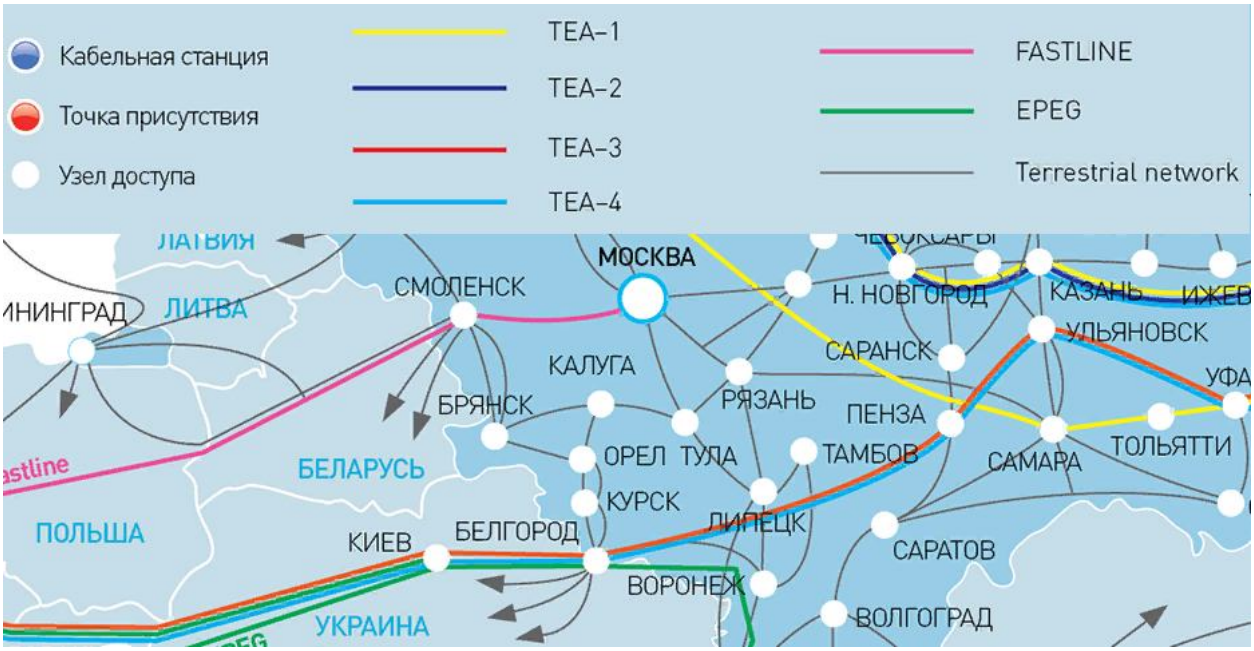


Рис. 3. Схема карты покрытия ВОЛС ПАО «Ростелеком»

Fig. 3. Scheme of the coverage map of the VOLS of PJSC "Rostelecom"

Согласно программе устранения цифрового неравенства 2014 г. к 2030 г. все населенные пункты численностью 250–500 человек должны иметь возможность высокоскоростного доступа к услугам Triple Pay. На сегодняшний день подключены порядка 12,5 тыс. населенных пунктов, оставшаяся часть работ должна быть завершена до конца года.

Triple Pay представляет три основных массовых информационно-коммуникационно-развлекательных сервиса: телефония, телевидение и интернет-коммуникации (условно – передача данных). В прошлом они были разделены технологически и организационно: каждый базировался на собственной инфраструктуре. Для пользователя это выглядело как телефонный провод, телевизионный кабель и «интернетный» провод или розетка. Соответственно разные операторы предоставляли разные услуги: телефонную связь – традиционные телефонные операторы (ГТС), телерадиовещание – например, РТРС или «НТВ-Плюс», услуги Интернета – интернет-провайдеры (ISP).

В настоящее время оператор мультисервисной сети, который обеспечивает своим абонентам широкополосное IP-подключение (со скоростью не менее нескольких мегабит в секунду), способен в принципе все три наиболее массовых и привычных сервиса предоставлять одновременно через IP-канал. Техноло-

гически такие IP-каналы могут быть разными (на основе xDSL, Ethernet), главное, чтобы они обеспечивали нужную полосу пропускания и были управляемыми с точки зрения качества: поддерживали приоритизацию различных типов трафика, различные уровни обслуживания. Следует отметить, что оператор такой мультисервисной сети не просто воспроизводит старые услуги на новой технологической базе, но и делает их более интересными, качественно иными и обязательно расширяет этот список новыми услугами, которые отсутствовали в традиционных сетях. Например, наряду с телепрограммами (видео) в IP-сети можно вещать и радиопрограммы (аудио), причем с любым качеством, вплоть до многоканального Dolby Stereo Surround 5.1. Сегодня в IP-сети доступны и весьма популярны сетевые компьютерные игры, web-чаты, всевозможные интернет-пейджеры (типа Skype или ICQ). Таким образом, triple play – это, в сущности, маркетинговый термин, подобный NGN, поскольку и в том и в другом случае речь идет об операторской мультисервисной IP-сети, о современных IP-технологиях.

В каждом муниципальном образовании Курской области, на территории которых развернута сеть «Ростелеком», располагаются точки присоединения к зоновой сети. Данные точки предназначены для предоставления населению услуги телефонии.

Кроме того, ПАО «Ростелеком» предоставляет своим абонентам услуги кабельного телевидения, которые реализуются двумя способами:

1) по сети IP/MPLS (технология IP/TV);

2) по гибридной оптико-коаксиальной сети (КТВ/HFC)

В данном случае узлы ввода и головные станции также располагаются в г. Курске.

В настоящее время политика ПАО «Ростелеком» направлена на увеличение количества пользователей, проживающих в сельской местности. По данным на 1 января 2019 г., на территории Курской области подключено 684 АТС на территории по ВОЛС. Стратегия развития сельских телефонных сетей предполагает перевод всех сельских АТС на ВОЛС.

Еще одно направление в стратегии развития ПАО «Ростелеком» – это увеличение количества корпоративных клиентов. В настоящее время малый и средний бизнес получают поддержку от государства, соответственно, для их гармоничного развития и успешного функционирования существует потребность в качественных, современных услугах связи, высоких скоростях и пропускной способности сети. Это обусловливает потребность в переходе с аналогового на цифровое телекоммуникационное оборудование.

На сегодняшний день в ПАО «Ростелеком» осуществляется переход магистрального сетевого оборудования на единый вендор Cisco. Поскольку функционирующие в настоящий момент телекоммуникационные сети, оператором которых выступает ПАО «Ростелеком», не в состоянии обеспечить полное сопряжение, гибкость и пропускную способность оборудования Cisco с уже функционирующим, этот факт говорит об актуальности модернизации уже существующих сетей телекоммуникаций.

Сформировав группу, состоящую из шести экспертов, являющихся специалистами ПАО «Ростелеком», было принято решение об организации телекоммуникационной сети между городами Курск и Орел на основе применения оборудования Ethernet. В данном случае предполагается, что волоконно-оптический кабель, проложенный на опорах ЛЭП, является средой для передачи.

Для успешной прокладки кабеля на участке Курск – Железногорск необходимо произвести анализ местности, определить среднюю температуру участка в разные времена года и также произвести исследование почвы с целью оптимального размещения опор, предназначенных для прокладки кабеля воздушным способом. В рамках этих исследований были проанализированы средние результаты метеонаблюдений за прошедшие 10 лет, которые проиллюстрированы ниже (рис. 4).

	Январь	Февраль	март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Средний температура (°C)	-6.2	-5.7	-0.9	8.2	14.8	18.4	21	20.1	14	7.2	1.1	-3.2
минимум температура (°C)	-8.8	-8.8	-5	2.7	9.1	13.1	15.9	14.9	9.7	3.9	-1.3	-5.4
максимум температура (°C)	-4.2	-3.2	2.7	13	19.4	22.7	25.4	24.7	18.2	10.5	3.3	-1.2
Норма осадков (мм)	51	44	47	50	60	68	70	55	59	59	46	48
Влажность(%)	86%	86%	80%	66%	63%	64%	66%	61%	68%	75%	83%	85%

Рис. 4. Средние показатели метеонаблюдений на территории Курской области за прошедшие 10 лет

Fig. 4. Average indicators of meteorological observations in the Kursk region over the past 10 years

Одной из основных особенностей Курской области является наличие черноземной почвы, которая имеет свойство накапливать влагу, вследствие чего почва промерзает. Курская область находится в умеренном климате. Она имеет значительное количество осадков

в течение года. Климат области умеренно континентальный, средняя дневная температура в летние месяцы около +18…+21 °С (максимальная +24 °С), средняя температура в зимние месяцы около −3…-6 °С (минимальная −8 °С).

Расположение оконечных пунктов является ключевым моментом для определения трассы прокладки ВОК. При выборе трассы следует принимать во внимание следующие основные требования:

1. Реализовать минимизацию капитальных затрат на организацию ВОЛС. Для выполнения минимизации капитальных затрат следует учитывать следующие факторы: протяженность трассы; наличие и сложность возникающих препятствий (рек, автомобильных и железных дорог, трубопроводов); учет характеристик местности прокладки кабеля (рельеф, тип почвы, расположение грунтовых вод); возможность применения механизированной прокладки; необходимость защиты сооружений телекоммуникационной сети от коррозии и электромагнитных влияний; возможность и условия доставки грузов (материалов, оборудования) на при строительстве трассы в любое время года.

2. Минимизация эксплуатационных расходов.

3. Удобство в обслуживании.

Второе и третье требования целесообразно обеспечить путем создания соответствующих условий для исполнения служебных обязанностей.

Кроме вышеперечисленного, трасса прокладки кабеля должна проходить по наикратчайшему пути между оконечными точками при наличии минимального количества препятствий (или полном их отсутствии). Вне населенных пунктов трассу следует прокладывать вдоль автомобильных дорог с твердым или грунтовым покрытием. В исключительных случаях спрямление трассы оправдано, когда организация линии связи вдоль автомобильной дороги значительно ее удлиняет.

В случаях, когда трасса проходит через водные преграды, переходы следует осуществлять в тех местах, где преграда имеет наименьшую ширину при отсутствии каменистых либо скальных грунтов, заболоченных берегов, причалов, стоянок судов, паромных переправ, перекатных участков, заторов льда и т. п.

Трассу ВОЛС Курск – Железногорск предполагается проложить вдоль автомобильных дорог на линиях электропередачи. Трасса проходит вдоль автодороги Крым Е/М2 и автодороги Фатеж – Железногорск. Предлагаемая трасса будет проходить так, как показано ниже (рис. 5).

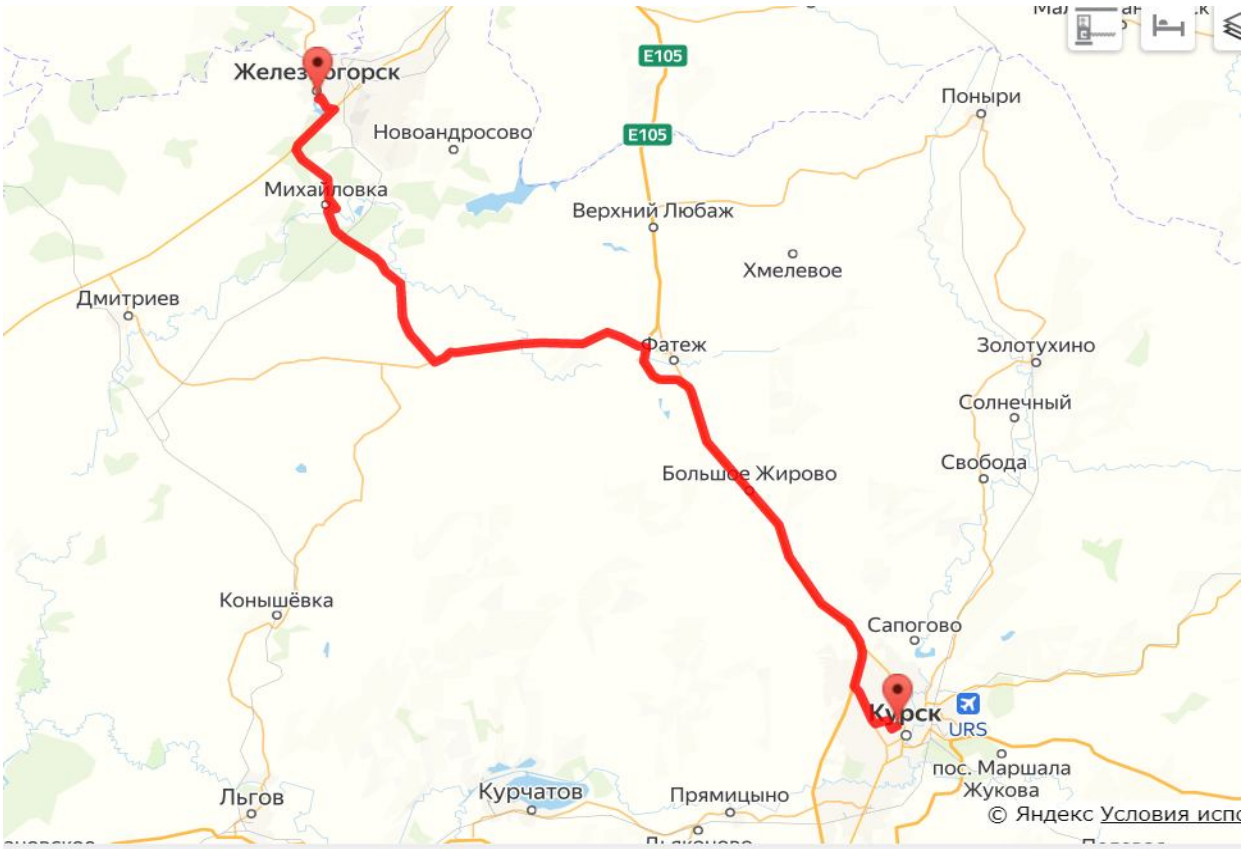


Рис. 5. Схема трассы Курск – Железногорск

Fig. 5. Scheme of the route Kursk – Zheleznogorsk

Размещение оптического кабеля предполагается проводить по опорам ЛЭП 220 кВ, при этом проектируемая протяженность трассы составляет 110 км. В промежуточных пунктах предполагается организовывать узлы доступа в узлах доступа ПАО «Ростелеком».

Главным преимуществом данного варианта является то, что данный маршрут является кратчайшим из предложенных. В данном случае понадобится наименьшее число опор, предназначенных для реализации магистральной ВОЛС. Это позволяет обойтись меньшими затратами на строительство.

Оптимальное размещение трассы, показанное на рисунке 6, пройдет через 11 малонаселенных пунктов, что способствует дальнейшему развитию инфраструктуры региона.

Таким образом, благодаря прокладыванию транспортной сети Курск – Железногорск, помимо г. Железногорска, высокоскоростные услуги связи будут доступны жителям следующих населенных пунктов:

– поселение Касиновский;
– деревня Татаренкова;
– деревня Верхняя Медведица;
– село Большое Жирово;
– деревня Русановка;
– деревня Басовка;

– село Линец;
– село Рышково;
– слобода Михайловка;
– поселок Тепличный;
– поселок Горняцкий.

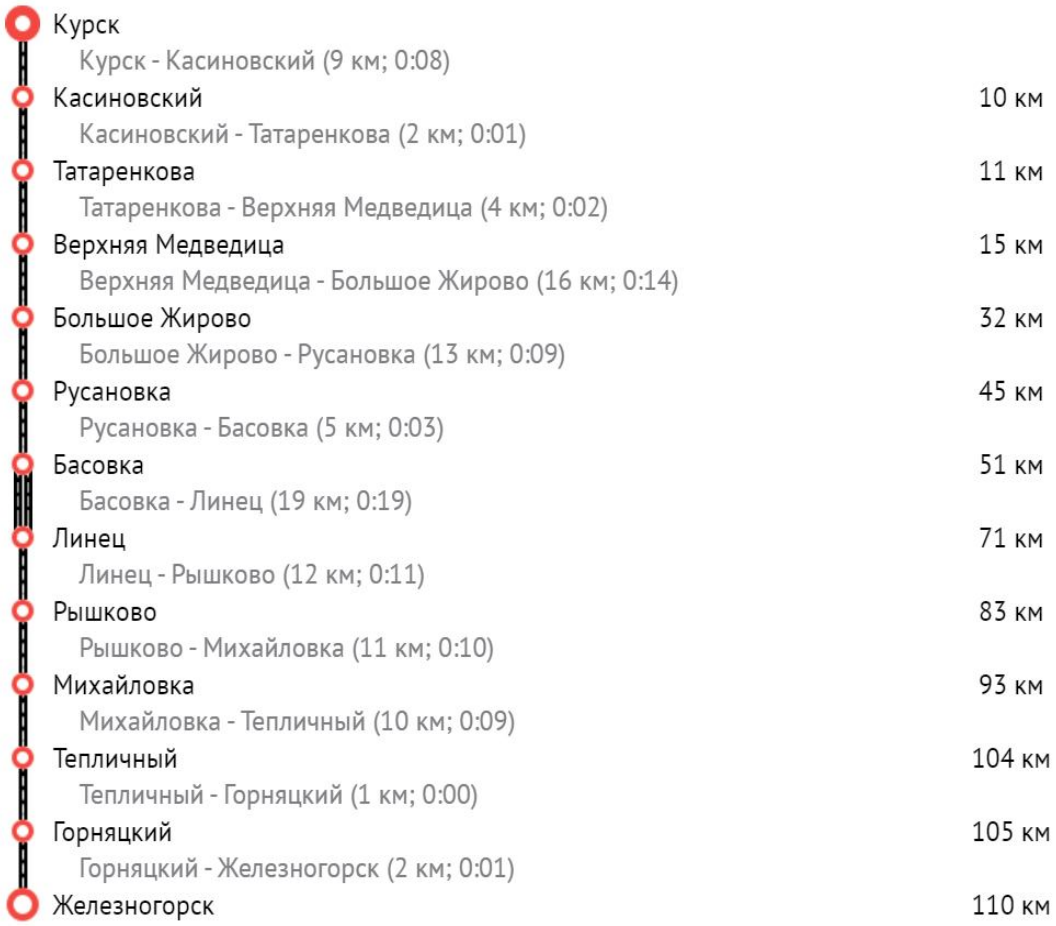


Рис. 6. Населенные пункты, через которые пройдет трасса Курск – Железногорск

Fig. 6. Settlements through which the route Kursk – Zheleznogorsk will pass

Выводы

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) нашли самое широкое применение в среде телекоммуникаций.

Ряд достоинств и преимуществ, включающих в себя самую высокую пропускную способность, электромагнитную помехозащищённость, долговечность, безопасность, в сравнении с традиционными кабельными линиями связи позволяют ВОЛС стать незаменимой направляющей средой передачи для строительства и модернизации телекоммуникационных объектов.

Наряду с перечисленными преимуществами существует ряд недостатков. Создание ВОЛС требует использования дорогостоящих высоконадёжных электронных элементов в составе передатчиков и приемников оптического излучения. Соединение оптических кабелей

должно производиться коннекторами с ничтожными оптическими потерями. В этой связи монтаж ВОЛС требует значительных затрат на оборудование.

Однако отмеченные недостатки перекрываются значительными преимуществами применения ВОЛС. Тем более, что в связи с развитием промышленных производств повсеместно наблюдается снижение цен на волоконно-оптическое оборудование и кабельную продукцию.

Внедрение ВОЛС в сеть кабельных СПД позволяет решать проблему преодоления больших расстояний за счет малого затухания передаваемого сигнала и сравнительно небольшого требуемого числа регенераторов сети.

Данный факт актуален для территории нашей страны. Специалистами ПАО «Ростелеком» производится перевод магистрального оборудования на единый вендор Cisco, так как существующая сеть связи между городами Курск и Брянск никаких услуг (за исключением традиционной междугородней связи) не может предоставить населению.

Учитывая уровень доходов населения г. Курск и г. Железногорска, его платежеспособность и вследствие этого высокий спрос на современные услуги связи, актуальной видится необходимость организации волоконно-оптической линии связи между городами Курск и Железногорск.

Стратегическим решением специалистов ПАО «Ростелеком» было соединение населенных пунктов Курск и Железногорск через ряд поселков на основе оборудования Ethernet, а физической средой для передачи информации использовать ВОК, который прокладывается на территории Курской области на опорах ЛЭП.

Проектируемая протяженность трассы ВОЛС Курск – Железногорск составляет 110 км. В промежуточных пунктах предполагается организовывать узлы доступа в узлах доступа «Ростелеком».

Список литературы

1. Степанов А. А. Особенности волоконно-оптических линий связи // Системный администратор. 2017. № 3. С. 17-19.

2. Дмитриев А. Л. Оптические системы передачи информации. СПБ.: ИТМО, 2017. С. 96.

3. Гроднев Н. Н. Волоконно-оптические системы передачи и кабели // Радио и связь. 2017. № 6. С. 22-27.

4. Томакова Р. А., Томаков В. И. Российский рынок труда в сфере информационных технологий // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. 2022. Т. 12, № 1. С. 150-166.

5. Пропускная способность оптических волокон. URL: http://www.laserportal.ru/content_833 (дата обращения: 29.05.2022).

6. Магистральная сеть связи. URL: https://www.company.rt.ru/about/net/magistr/# (дата обращения: 02.05.2022).

7. Шевцов А. Н., Томакова Р. А. Перспективы развития концепции Internet of Things // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам V Всероссийской научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2021. С. 115-122.

8. Левченко В. В. Проектирование магистральной волоконно-оптической линии связи // Техносфера. 2016. № 7. С. 39-43.

9. Беляев А. Ф. Оптические кабели // Связь. 2014. № 7. С. 37-38.

10. Лахина Е. Р., Томакова Р. А. Технология пространственного анализа данных в геоинформационных системах // Программная инженерия: современные тенденции развития и применения (ПИ-2020): сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 30-летию создания кафедры программной инженерии. Курск: Университетская книга, 2020. С. 42-47.

11. Шевцов А. Н., Томакова Р. А. Перспективные инструменты развития информационной экономики в отрасли телекоммуникаций // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам V Всероссийской научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2021. С. 122-128.

12. Томакова Р. А., Шевцов А. Н. Способ построения телекоммуникационной сети передачи данных с борта воздушного судна на наземный диспетчерский пункт // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 157-173.

13. Титенко Е. А., Талдыкин Е. В. Коммутационная модель параллельных сравнений элементов для продукционных систем, управляемых потоком данных // Известия ЮФУ. Технические науки. 2020. № 7 (217). С. 19-34.

14. Комбинированный метод анализа и выбора сложных технических или социально-экономических объектов / В. Л. Бурковский, Б. А. Шиянов, А. В. Гривачев [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14, № 2. С. 15-20.

15. Анализ стратегий игровых пространств с использованием нейронных сетей / Р. А. Томакова, В. В. Джабраилов, М. В. Томаков, И. С. Егоров, Д. К. Реутов // Известия

Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 2. С. 51-65.

16. Мухин И. Е., Коптев Д. С., Чуев А. А. Оптоволоконные системы на основе ячеек Брэгга – будущее создания комплексных систем диагностики и прогностики летательных аппаратов // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам V Всероссийской научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2021. С. 74-84.

17. Довбня В. Г., Коптев Д. С. Основные направления повышения помехозащищенности радиоприемных систем на основе пространственно-временной обработки сложных сигналов в антенном устройстве // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 36-50.

18. Долженков В. Ю., Севрюков А. Е. Выбор оптимального мобильного оператора для поселка городского типа // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2020. С. 66-71.

19. Довбня В. Г., Коптев Д. С. Математическая модель непрерывного канала связи с памятью цифровых линий связи // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам V Всероссийской научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2021. С. 94-103.

20. Севрюков А. Е., Стребков Д. А. Метод распознавания уровня качества обслуживания трафика сетевыми маршрутами в условиях импликатного наблюдения // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 3. С. 78-101.

21. Довбня В. Г., Коптев Д. С. Модифицированная математическая модель приемного тракта цифровых линий связи // Телекоммуникации. 2022. № 6. С. 16-23.

References

1. Stepanov A. A. Osobennosti volokonno-opticheskix linij svyazi [Features of fiber-optic communication lines]. *Sistemny`j administrator = System Administrator*. 2017, no. 3, pp. 17-19.

2. Dmitriev A. L. Opticheskie sistemy` peredachi informacii [Optical information transmission systems]. St. Petersburg, ITMO Publ., 2017, p. 96.

3. Grodnev N. N. Volokonno-opticheskie sistemy` peredachi i kabeli [Fiber-optic transmission systems and cables]. *Radio i svyaz` = Radio and Communications*, 2017, no. 6, pp. 22-27.

4. Tomakova R. A., Tomakov V. I. Rossijskij ry`nok truda v sfere informacionny`x texnologij [The Russian labor market in the field of information technologies]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: E`konomika. Sociologiya. Menedzhment = Proceedings of the Southwest State University. Series: Economics, Sociology and Management*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 150-166.

5. Propusknaya sposobnost` opticheskix volokon [The bandwidth of optical fibers]. Available at: http://www.laserportal.ru/content_833. (accessed 29.05.2022)

6. Magistral`naya set` svyazi [Backbone communication network]. Available at: https://www.company.rt.ru/about/net/magistr/#. (accessed 02.05.2022)

7. Shevczov A. N., Tomakova R. A. [Prospects for the development of the concept of Internet of Things]. *Infokommunikacii i kosmicheskie texnologii: sostoyanie, problemy` i puti resheniya. Sbornik nauchny`x statej po materialam V Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii* [Infocommunications and space technologies: state, problems and solutions. Collection of scientific articles based on the materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2021, pp. 115-122. (In Russ.)

8. Levchenko V. V. Proektirovanie magistral`noj volokonno-opticheskoj linii svyazi [Designing a backbone fiber-optic communication line]. *Texnosfera = Technosphere*, 2016, no. 7, pp. 39-43.

9. Belyaev A. F. Opticheskie kabeli [Optical cables]. *Svyaz` = Connection*, 2014, no. 7, pp. 37-38.

10. Laxina E. R., Tomakova R. A. [Technology of spatial data analysis in geoinformation systems]. *Programmnaya inzheneriya: sovremenny`e tendencii razvitiya i primeneniya (PI-2020). Sbornik materialov IV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii, posvyashhennoj 30-letiyu sozdaniya kafedry` programmnoj inzhenerii* [Software engineering: modern trends of development and application (PI-2020). Collection of materials of the IV All-Russian Scientific and Practical conference dedicated to the 30th anniversary of the creation of the Department of Software Engineering]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2020, pp. 42-47. (In Russ.)

11. Shevczov A. N., Tomakova R. A. [Promising tools for the development of the information economy in the telecommunications industry]. *Infokommunikacii i kosmicheskie texnologii: sostoyanie, problemy` i puti resheniya. Sbornik nauchny`x statej po materialam V*

Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii [Infocommunications and space technologies: state, problems and solutions. Collection of scientific articles based on the materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2021, pp. 122-128. (In Russ.)

12. Tomakova R. A., Shevczov A. N. Sposob postroeniya telekommunikacionnoj seti peredachi danny`x s borta vozdushnogo sudna na nazemny`j dispetcherskij punkt [Method of building a telecommunication data transmission network from an aircraft to a ground control room]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vy`chislitel`naya texnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 157-173.

13. Titenko E. A., Taldykin E. V. Kommutacionnaya model` parallel`ny`x sravnenij e`lementov dlya produkcionny`x sistem, upravlyaemy`x potokom danny`x [Switching model of parallel comparisons of elements for production systems controlled by data flow]. *Izvestiya YuFU. Texnicheskie nauki = Proceedings SFU. Technical Sciences*, 2020, no. 7 (217), pp. 19-34.

14. Burkovskij V. L., Shiyanov B. A., Grivachev A. V., eds. Kombinirovanny`j metod analiza i vy`bora slozhny`x texnicheskix ili social`noe`konomicheskix ob`ektov [The combined method of analysis and selection of complex technical or socio-economic objects]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 15-20.

15. Tomakova R. A., Dzhabrailov V. V., Tomakov M. V., Egorov I. S., Reutov D. K. Analiz strategij igrovy`x prostranstv s ispol`zovaniem nejronny`x setej [Analysis of game space strategies using neural networks]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vy`chislitel`naya texnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, , 2021, vol. 11, no. 2, pp. 51-65.

16. Muxin I. E., Koptev D. S., Chuev A. A. [Fiber–optic systems based on Bragg cells – the future of creating integrated systems for diagnostics and prognostics of aircraft]. *Infokommunikacii i kosmicheskie texnologii: sostoyanie, problemy` i puti resheniya. Sbornik nauchny`x statej po materialam V Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii* [Infocommunications and space technologies: status, problems and solutions. Collection of scientific articles based on the materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2021, pp. 74-84. (In Russ.)

17. Dovbnya V. G., Koptev D. S. Osnovny`e napravleniya povy`sheniya pomexozashhishhennosti radiopriemny`x sistem na osnove prostranstvenno-vremennoj obrabotki slozhny`x signalov v antennom ustrojstve [The main directions of increasing the noise immunity of radio receiving systems based on spatio-temporal processing of complex signals in an antenna device]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vy`chislitel`naya texnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 36-50.

18. Dolzhenkov V. Yu., Sevryukov A. E. [Choosing the optimal mobile operator for an urban-type settlement]. *Infokommunikacii i kosmicheskie texnologii: sostoyanie, problemy` i puti resheniya. Sbornik nauchny`x statej po materialam IV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii* [Infocommunications and space technologies: state, problems and solutions. Collection of scientific articles based on the materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2020, pp. 66-71. (In Russ.)

19. Dovbnya V. G., Koptev D. S. [Mathematical model of a continuous communication channel with the memory of digital communication lines]. *Infokommunikacii i kosmicheskie texnologii: sostoyanie, problemy` i puti resheniya. Sbornik nauchny`x statej po materialam V Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii* Infocommunications and space technologies: state, problems and solutions. Collection of scientific articles on the materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2021, pp. 94-103. (In Russ.)

20. Sevryukov A. E., Strebkov D. A. Metod raspoznavaniya urovnya kachestva obsluzhivaniya trafika setevy`mi marshrutami v usloviyax implikatnogo nablyudeniya [Method of recognizing the level of quality of traffic service by network routes in conditions of implicit surveillance]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vy`chislitel`naya texnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*,, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 78-101.

21. Dovbnya V. G., Koptev D. S. Modificirovannaya matematicheskaya model` priemnogo trakta cifrovy`x linij svyazi [Modified mathematical model of the receiving path of digital communication lines]. *Telekommunikacii = Telecommunications*, 2022, no. 6, pp. 16-23.

Информация об авторах / Information about the Authors

Томакова Римма Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: rtomakova@mail.ru,
Researcher ID WoS: O-6164-2015,
ORCID: 0000-0003-0152-4714,
AuthorID: 739221

Rimma A. Tomakova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: rtomakova@mail.ru,
Researcher ID WoS: O-6164-2015,
ORCID: 0000-0003-0152-4714,
Author ID: 739221

Комаренко Сергей Владимирович, магистр, Юго-Западного государственного университета, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: ksv@veterra-group.com

Sergey V. Komarenko, Master, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: ksv@veterra-group.com

Степанов Дмитрий Александрович, магистр, Юго-Западного государственного университета, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: dimon.stepanov.1990@mail.ru

Dmitry A. Stepanov, Master, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: dimon.stepanov.1990@mail.ru

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, υ 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/.**