

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

**Юго-Западного
государственного университета**

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

Научный журнал

Том 15 № 2 / 2025

Proceedings

**of the Southwest
State University**

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

Scientific Journal

Vol. 15 № 2 / 2025



**Известия Юго-Западного
государственного университета.
Серия: Управление, вычислительная
техника, информатика. Медицинское приборостроение
(Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta.
Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika.
Meditsinskoe priborostroenie)
Научный рецензируемый журнал
Основан в 2011 г.**

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

В журнале публикуются оригинальные работы, обзорные статьи, рецензии и обсуждения, соответствующие тематике издания.

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

Целевая аудитория: научные работники, профессорско-преподавательский состав образовательных учреждений, экспертное сообщество, молодые ученые, аспиранты, заинтересованные представители широкой общественности.

Журнал придерживается политики открытого доступа. Полнотекстовые версии статей доступны на сайте журнала, научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU.

Журнал включен в перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора наук, кандидата наук по следующим научным специальностям:

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

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

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

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

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

2.3.8. Информатика и информационные процессы (технические науки).

3.3.9. Медицинская информатика (медицинские науки).

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Адрес учредителя, издателя и редакции:

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

Телефон: +7(4712) 22-25-26,

Факс: +7(4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (ПИ №ФС77-82285 от 23.11.2021).

ISSN 2223-1536 (Print)

Префикс DOI: 10.21869

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

© Юго-Западный государственный университет, 2025



Материалы журнала доступны под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:

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

Подписка и распространение:

журнал распространяется
по подписке.
Подписной индекс журнала 44288
в объединенном каталоге
«Пресса России».

Периодичность: четыре раза в год

Свободная цена.

Оригинал-макет подготовлен О. А. Леоновой

Подписано в печать 30.06.2025. Формат 60×84/8.

Дата выхода в свет 05.08.2025.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,1.

Тираж 1000 экз. Заказ 26.

16+



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

Peer-reviewed scientific journal

Published since 2011

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

The journal publishes scientific articles, critical reviews, reports and discussions in the above mentioned areas.

All papers are published free of charge.

Target readers are scientists, university professors and teachers, experts, young scholars, graduate and post-graduate students, stakeholders and interested public.

The Editorial Board of the journal pursues open access policy. Complete articles are available at the journal web-site and at eLIBRARY.RU .

The journal is included into the Register of the Top Scientific Journals of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation as a journal recommended for the publication of the findings made by the scientists working on a doctoral or candidate thesis in the following areas:

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

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

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

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

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

2.3.8. Informatics and information processes (technical sciences).

3.3.9. Medical informatics (medical sciences).

EDITOR-IN-CHIEF

Sergei G. Emelianov, Dr. of Sci. (Engineering), Correspondent Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, a Holder of the Russian Government Prize in the Field of Science and Engineering, Rector of the Southwest State University (Kursk, Russia)

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Founder and Publisher:

“Southwest State University”

Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:

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

Phone: (+74712) 22-25-26,

Fax: (+74712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

The Journal is officially registered by:

The Federal Supervising Authority in the Field of Communication,
Information Technology and Mass media
(PI №FS77-82285 of 23.11.2021).

ISSN 2223-1536 (Print)

DOI Prefix: 10.21869

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

Printing office:

Printing Center

of the Southwest State University,

50 Let Oktyabrya str., 94,

Kursk 305040, Russian Federation

Subscription and distribution:

the journal is distributed by subscription.

Subscription index 44288

in the General Catalogue “Pressa Rossii”

Frequency: Quarterly

Free price

Original lay-out design: O. A. Leonova

© Southwest State University, 2025



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

Signed for printing 30.06.2025. Format 60×84/8.

Release date 05.08.2025.

Offset paper. Printer's sheets: 27,1.

Circulation 1000 copies. Order 26.

16+

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ	8
Выявление личностной тревожности на основе электроэнцефалографии с использованием машинного обучения	8
<i>Авсиевич А. В., Жейков Д. С., Иващенко А. В., Авсиевич В. В., Широков И. А., Пономарев А. Е., Заров Е. В., Колсанов А. В.</i>	
Специализированная многофункциональная онлайн-платформа для формирования цифровой карьерной среды вуза.....	25
<i>Лапина Т. И., Хиневич О. С., Петрик Е. А., Коломиец Е. А.</i>	
Применение компьютерной программы в диагностике хронических риносинуситов	46
<i>Трусов Д. В., Субботина Т. И., Починина Н. К.</i>	
МЕХАТРОНИКА, РОБОТОТЕХНИКА.....	58
О влиянии неточностей изготовления конструктивных элементов пьезопреобразователя на длительность акустического зондирующего импульса	58
<i>Коновалов С. И., Вечёра М. С., Коновалов Р. С., Цаплев В. М., Юлдашев З. М.</i>	
Влияние качества функционирования устройства автоматической регулировки усиления на помехоустойчивость приёма сигналов цифровых линий связи и коррекция межсимвольных искажений	74
<i>Коптеев Д. С., Довбня В. Г.</i>	
Распознавание и обработка изображений	90
Разработка портативной системы для дифференцированной оценки стрессоустойчивости военнослужащих	90
<i>Щелканова Е. С., Журбин Е. А., Маркин И. В., Письменный Г. М., Назарова М. Р.</i>	
Методы анализа телематических данных для систем поддержки принятия решений оптимального беспилотного управления автомобилями	108
<i>Ходукин Р. А., Томакова Р. А., Малышев А. В.</i>	
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ.....	119
Рекомендационная система антипрокрастинационного трекинга на базе ChatGPT и персональных данных	119
<i>Сидоров А. М., Томакова Р. А., Реутов Д. К.</i>	
Определение центральной температуры тела при предменном медицинском осмотре	130
<i>Савченко В. В., Сясько В. А.</i>	
Метод управления бригадами машин службы скорой медицинской помощи на основе использования геоинформационных систем	153
<i>Коломиец Е. А., Лапина Т. И.</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	169
Мобильный многопараметрический программно-аппаратный комплекс мониторинга показателей здоровья человека	169
<i>Харланова К. С., Ревякина М. О., Селихов А. В., Донцов В. М., Мишин В. В.</i>	
Модель и реализация комбинаторного разбора языков, заданных контекстно-свободными грамматиками	190
<i>Чаплыгин А. А.</i>	
Математическое моделирование взаимодействия элементов электромеханической многозвенной системы на примере реабилитационного экзоскелета нижних конечностей	204
<i>Яцун С. Ф., Печурин А. С., Савельева Е. В.</i>	
Разработка алгоритма диагностики эндотелиальной дисфункции у больных с хроническим риносинуситом	221
<i>Трусов Д. В., Субботина Т. И., Починина Н. К.</i>	
К сведению авторов.....	233

CONTENT

INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS	8
Detection of personal and situational anxiety based on electroencephalography using machine learning	8
<i>Avsievich A.V., Zheikov D.S., Ivaschenko A.V., Avsievich V.V., Shirokov I.A., Ponomarev A.E., Zarov E.V., Kolsanov A.V.</i>	
A specialized multifunctional online platform for the formation of a university's digital career environment	25
<i>Lapina T.I., Khinevich O.S., Petrik E.A., Kolomiets E. A.</i>	
The use of a computer program in the diagnosis of chronic rhinosinusitis	46
<i>Trusov D.V., Subbotina T.I., Pochinina N.K.</i>	
MECHATRONICS, ROBOTICS	58
On the influence of manufacturing inaccuracies of the structural elements of a piezoelectric transducer on the duration of an acoustic probing pulse	58
<i>Konovalov S.I., Vechera M.S., Konovalov R.S., Tsaplev V.M., Yuldashev Z.M.</i>	
Influence of the quality of functioning of the automatic gain control device on the noise immunity of reception of signal digital communication lines and correction of intersymbol distortions	74
<i>Koptev D.S., Dovbnya V.G.</i>	
IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING	90
Development of a portable system for differentiated assessment of stress resistance of military personnel	90
<i>Shchelkanova E.S., Zhurbin E.A., Markin I.V., Pismennyi G.M., Nazarova M.R.</i>	
Methods of telematics data analysis for decision support systems for optimal unmanned vehicle control	108
<i>Khodukin R.A., Tomakova R.A., Malyshev A.V.</i>	
SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING	119
Recommendation system for anti-procrastination tracking based on ChatGPT and personal data	119
<i>Sidorov A.M., Tomakova R.A., Reutov D.K.</i>	
Determination of core body temperature during pre-shift medical examination	130
<i>Savchenko V.V., Syasko V.A.</i>	
A method of managing ambulance crews based on the use of geographic information systems	153
<i>Kolomiets E.A., Lapina T.I.</i>	
MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS	169
Mobile multiparameter hardware and software complex for monitoring human health indicators	169
<i>Kharlanova K.S., Revyakina M.O., Selikhov A.V., Dontsov V.M., Mishin V.V.</i>	
Modeling and implementation of context free grammar combinatorial parser	190
<i>Chaplygin A.A.</i>	
Mathematical modeling of the interaction of elements of an electromechanical multilink system using the example of a rehabilitation exoskeleton of the lower extremities	204
<i>Yatsun S.F., Pechurin A.S., Saveleva E.V.</i>	
Development of an algorithm for diagnosing endothelial dysfunction in patients with chronic rhinosinusitis	221
<i>Trusov D.V., Subbotina T.I., Pochinina N.K.</i>	
Information for Authors	233

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-8-24>



УДК 004.89:004.93

Выявление личностной тревожности на основе электроэнцефалографии с использованием машинного обучения

А. В. Авсиевич¹, Д. С. Жейков¹✉, А. В. Иващенко¹, В. В. Авсиевич¹,
И. А. Широков¹, А. Е. Пономарев¹, Е. В. Заров¹, А. В. Колсанов¹

¹ Самарский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. Чапаевская, д. 89, г. Самара 443099, Российская Федерация

✉ e-mail: d.s.zhejkov@samsmu.ru

Резюме

Цель исследования. Электроэнцефалография в настоящее время успешно используется для диагностики и реабилитации психологических и когнитивных расстройств. При этом в практическом здравоохранении возникают трудности, связанные со слабостью в объективной оценке выраженности тревожных состояний и необходимостью учитывать индивидуальные особенности пациентов. Данные особенности трудно алгоритмизировать, но можно учесть при реализации методов машинного обучения. Цель исследования – оценить возможность применения технологий машинного обучения для идентификации уровня тревожности, коррелируемой с методикой Спилбергера-Ханина, по данным электроэнцефалографии.

Методы. Для идентификации тревожности в основной и контрольных группах использован метод Спилбергера-Ханина, который позволяет дифференцированно измерять тревожность как личностное свойство. Запись альфа-ритмов производилась с помощью 6-канальной электроэнцефалографии. В качестве средства машинного обучения использована библиотека CatBoost, реализующая алгоритм градиентного бустинга с минимизацией функции потерь.

Результаты. В эксперименте участвовало 92 респондента, разделенные по итогам тестирования на три группы. Все испытуемые перед прохождением тестирования находились в состоянии покоя 1,5 минуты с включенной записью ЭЭГ, далее им предлагалось пройти тест на определение личностной тревожности при синхронной записи параметров альфа-ритма. По итогам тестирования респонденты были разделены на три группы в соответствии с уровнем определенной тревожности. Проведенное исследование выявило зависимость между разными уровнями тревожности по шкале Спилбергера-Ханина и видом электроэнцефалограммы у испытуемых, что дает возможность перехода от тестирования пациентов к снятию и интерпретации ЭЭГ.

Заключение. В ходе проведенного исследования выявлена положительная зависимость между разными уровнями личностной тревожности по шкале Спилбергера-Ханина и видом электроэнцефалограммы у испытуемых с точностью до 14%. Показано, что при определении тревожности возможно заменить тест, основанный на методике Спилбергера-Ханина на определение тревожности по ЭЭГ с использованием технологии машинного обучения.

© Авсиевич А. В., Жейков Д. С., Иващенко А. В., Авсиевич В. В.,
Широков И. А., Пономарев А. Е., Заров Е. В., Колсанов А. В., 2025

Ключевые слова: искусственный интеллект; электроэнцефалография; диагностика тревожности; психодиагностика, машинное обучение.

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

Для цитирования: Выявление личностной тревожности на основе электроэнцефалографии с использованием машинного обучения / А. В. Авсиевич, Д. С. Жейков, А. В. Иващенко, В. В. Авсиевич, И. А. Широков, А. Е. Пономарев, Е. В. Заров, А. В. Колсанов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 2. С. 8–24. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-8-24>

Поступила в редакцию 16.04.2025

Подписана в печать 17.05.2025

Опубликована 30.06.2025

Detection of personal and situational anxiety based on electroencephalography using machine learning

Alexandr V. Avsievich¹, Denis S. Zheikov¹✉, Anton V. Ivaschenko¹,
Vladimir V. Avsievich¹, Ilya A. Shirokov¹, Artem E. Ponomarev¹,
Evgeniy V. Zarov¹, Alexander V. Kolsanov¹

¹ Samara State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation
89 Chapayevskaya Str., Samara 443099, Russian Federation

✉ e-mail: d.s.zheikov@samsmu.ru

Abstract

The purpose of research. Nowadays electroencephalography is successfully used for diagnostics and rehabilitation of psychological and cognitive disorders. At the same time, practical healthcare meets with the difficulties related to the weakness in objective assessment of the severity of anxiety states and the requirement to consider the individual characteristics of patients. These features are difficult to formalize, but can be taken into account when implementing machine learning methods. The purpose of the study is to evaluate the possibility of using machine learning technologies to identify the level of anxiety correlated with the Spielberger-Khanin method, according to electroencephalography data.

Methods. To identify anxiety in the main and control groups, the Spielberger-Khanin method was used, which allows for differential measurement of anxiety as a personal trait. Alpha rhythms were recorded using 6-channel electroencephalography. The CatBoost library, which implements a gradient boosting algorithm with loss function minimization, was used as a machine learning tool.

Results. The experiment involved 92 respondents, divided into three groups based on the testing results. Before testing, all subjects were in a state of rest for 1.5 minutes with the EEG recording turned on. Then they were asked to take a test to determine personal anxiety with synchronous recording of alpha rhythm parameters. Based on the results of testing, respondents were divided into three groups in accordance with the level of a certain anxiety. The study revealed a relationship between different levels of anxiety according to the Spielberger-Khanin scale and the type of electroencephalogram in subjects, which makes it possible to move from testing patients to recording and interpreting EEG.

Conclusion. The study revealed a positive relationship between different levels of personal anxiety according to the Spielberger-Khanin scale and the type of electroencephalogram in subjects with an accuracy of up to 14%. It is shown that when determining anxiety, it is possible to replace the test based on the Spielberger-Khanin method for determining anxiety by EEG using machine learning technology.

Keywords: artificial intelligence; electroencephalography; anxiety diagnostics; psychodiagnostics; machine learning.

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

For citation: Avsievich A. V., Zheikov D. S., Ivaschenko A. V., Avsievich V. V., Shirokov I. A., Ponomarev A. E., Zarov E. V., Kolsanov A. V. Detection of personal and situational anxiety based on electroencephalography using machine learning. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2025;15(2):8–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-8-24>

Received 16.04.2025

Accepted 17.05.2025

Published 30.06.2025

Введение

В настоящее время электроэнцефалография (ЭЭГ) широко применяется в качестве неинвазивного метода исследования функционального состояния головного мозга при диагностике различных психологических и когнитивных расстройств [1]. Современные устройства ЭЭГ [2; 3] позволяют получать достаточно адекватные характеристики электрической активности головного мозга. Однако низкая выраженность сигналов, свидетельствующих о психологических и когнитивных процессах, а также их индивидуальные особенности обуславливают сложность их применения в практическом здравоохранении. Вместе с тем результаты современных исследований показывают достаточно высокую эффективность программно-аппаратных комплексов ЭЭГ для исследования эмоциональных реакций и когнитивных процессов. В частности, ряд авторов подчеркивают важность исследований, связанных с ритмами ЭЭГ и когнитивными процессами [4]. Дополнительно рассматриваются индивидуальные характеристики ЭЭГ и их влияние на время реакции [5] и разработка

аппаратно-программных комплексов для диагностики психофизиологического состояния [6].

Одной из актуальных задач применения ЭЭГ в персонализированной медицинской диагностике и реабилитации является анализ тревожности [7; 8].

При этом учитываются личностные особенности пациентов и разные условия проведения экспериментов [9; 10]. Проведенные исследования подтверждают возможность использования электроэнцефалографии для различных оценок тревожности [11; 12; 13].

Электроэнцефалография также используется для исследования личной тревожности при когнитивной деятельности [14; 15], а также связь биоэлектрической активности мозга с клиническими особенностями течения депрессивных расстройств [16; 17].

Учитывая возможности статистического анализа результатов ЭЭГ для персонализированной оценки тревожности, перспективным является применение программных средств искусственного интеллекта для обработки и анализа данных. В продолжение указанных исследований в настоящей статье предложена

методика выявления личностной и ситуативной тревожности на основе электроэнцефалографии с использованием методов обработки больших данных.

Материалы и методы

Личностная тревожность характеризуется устойчивую склонность воспринимать большой круг ситуаций как угрожающие, реагировать на такие ситуации состоянием тревоги. Реактивная тревожность характеризуется напряжением, беспокойством, нервозностью. Высокая реактивная тревожность вызывает нарушение внимания, иногда нарушение тонкой координации. Высокая личностная тревожность прямо коррелирует с наличием невротического конфликта, с эмоциональными и невротическими срывами и психосоматическими заболеваниями.

Измерение тревожности как свойства личности особенно важно, так как это свойство во многом обуславливает поведение субъекта. Определенный уровень тревожности – естественная и обязательная особенность активной деятельной личности. У каждого человека существует свой оптимальный, или желательный, уровень тревожности – это так называемая полезная тревожность.

Оценка человеком своего состояния в этом отношении является для него существенным компонентом самоконтроля и самовоспитания. Следует отметить, что тревожность является естественной и обязательной особенностью активной личности. Существует

даже так называемый оптимальный уровень «полезной» тревоги. В то же время чрезмерное повышение уровня тревожности ведет к развитию негативных последствий.

Диагностика Спилберга – Ханина [18; 19] – одна из методик, которая позволяет дифференцированно измерять тревожность и как личностное свойство, и как состояние, связанное с текущей ситуацией. Этот тест поможет определить выраженность тревожности в структуре личности. Современные технологии анализа больших данных позволяют выявить зависимость между разными уровнями тревожности по шкале Спилберга – Ханина и видом электроэнцефалограммы у испытуемых.

Методика Спилберга – Ханина представляет собой совокупность тестов по личной и ситуационной тревожности, которые имеют по 20 вопросов с четырьмя возможными исходами [19]. Каждый исход имеет вес от 1 до 4 в рамках одного вопроса. При обработке результатов тестирования складываются веса ответов, выбранных испытуемым.

Полученный результат соотносят со шкалой Спилберга – Ханина для выявления класса тревожности. Шкала Спилберга – Ханина представляет собой отрезок от 20 до 80, неравномерно разбитый на три части (классы). Первый класс включает диапазон 20–30, второй класс – от 31 до 44 и третий класс – от 45 до 80. Возникает вопрос: какое распределение вероятности в случае ответа респондентов случайным образом?

Определим количество всех возможных исходов как $4^{20} = 1099511627776$. Методом перебора всех возможных результатов и их отнесения к соответствующему классу получим, что 1 класс имеет 25484305, 2 класс – 150069214646 и 3 класс – 949416928825 исхода. В

результате вероятность при случайном выборе классов составит для 1 класса – 0,0000232 (0,0023%), 2 – 0,1364872 (13,6487%) и 3 – 0,86348976 (86,3490%). Для наглядности на рисунке 1 представлен график плотности вероятности по классам в процентном соотношении.



Рис. 1. Плотность вероятности по классам тревожности

Fig. 1. Probability density by anxiety classes

Как видно из представленных расчетов, при прохождении теста имеют быть больше триллиона исходов и наиболее вероятное попадание респондента в третий класс при случайном выборе ответов в тесте Спилберга – Ханина.

Экспериментальная часть

Исходя из предположения неизменности личностной тревожности без терапии был проведен эксперимент на 92 респондентах. Суть эксперимента заключается в следующем.

Все испытуемые перед прохождением тестирования находились в состоянии покоя 1,5 минуты с включенной записью ЭЭГ, далее им предлагалось пройти тест на определение личностной тревожности по методике Спилберга – Ханина при синхронной записи параметров альфа-ритма. В первую группу испытуемых были включены респонденты, у которых уровень тревожности по методике Спилберга – Ханина составил от 20 до 30 баллов. Ко второй группе испытуемых были отнесены

респонденты, у которых уровень тревожности по методике Спилбергера – Ханина составил от 31 до 44 баллов. В третью группу испытуемых были включены респонденты, у которых уровень тревожности по методике Спилбергера – Ханина составил от 45 до 80 баллов. В процессе эксперимента запись альфа-ритмов производилась с помощью 6-канальной электроэнцефалографии (ЭЭГ). Датчики на голове пациента располагают так, чтобы зафиксировать активность всех отделов мозга. В работе использовались данные альфа-ритма с датчиков ЭЭГ устройства NEUROPLAY-6C [20].

Устройство ЭЭГ имеет шесть каналов для снятия сигналов: Fp1, Fp2, T3, T4, O1, O2, снимаемых активными сухими электродами со сменной частью и покрытием Ag/AgC. Для определения тревожности в ходе эксперимента будут задействованы каналы O1, O2.

Тестирование проводилось на разработанном программном обеспечении Передовой медицинской инженерной школы в Самарском государственном медицинском университете (элементы интерфейса приведены на рис. 2). Результат прохождения выводится в отдельный текстовый файл.

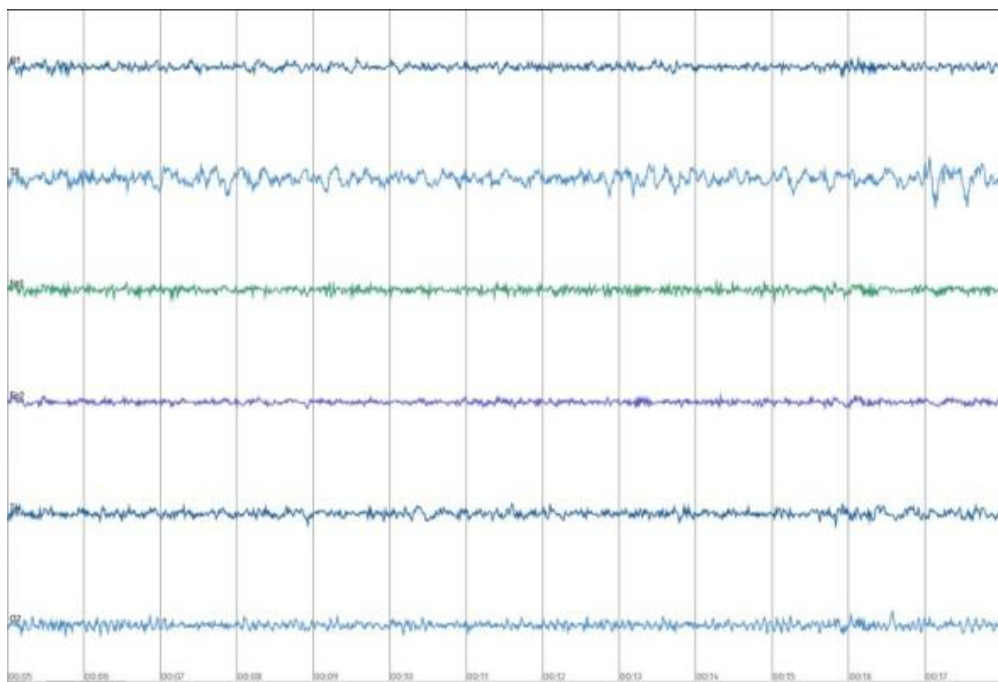


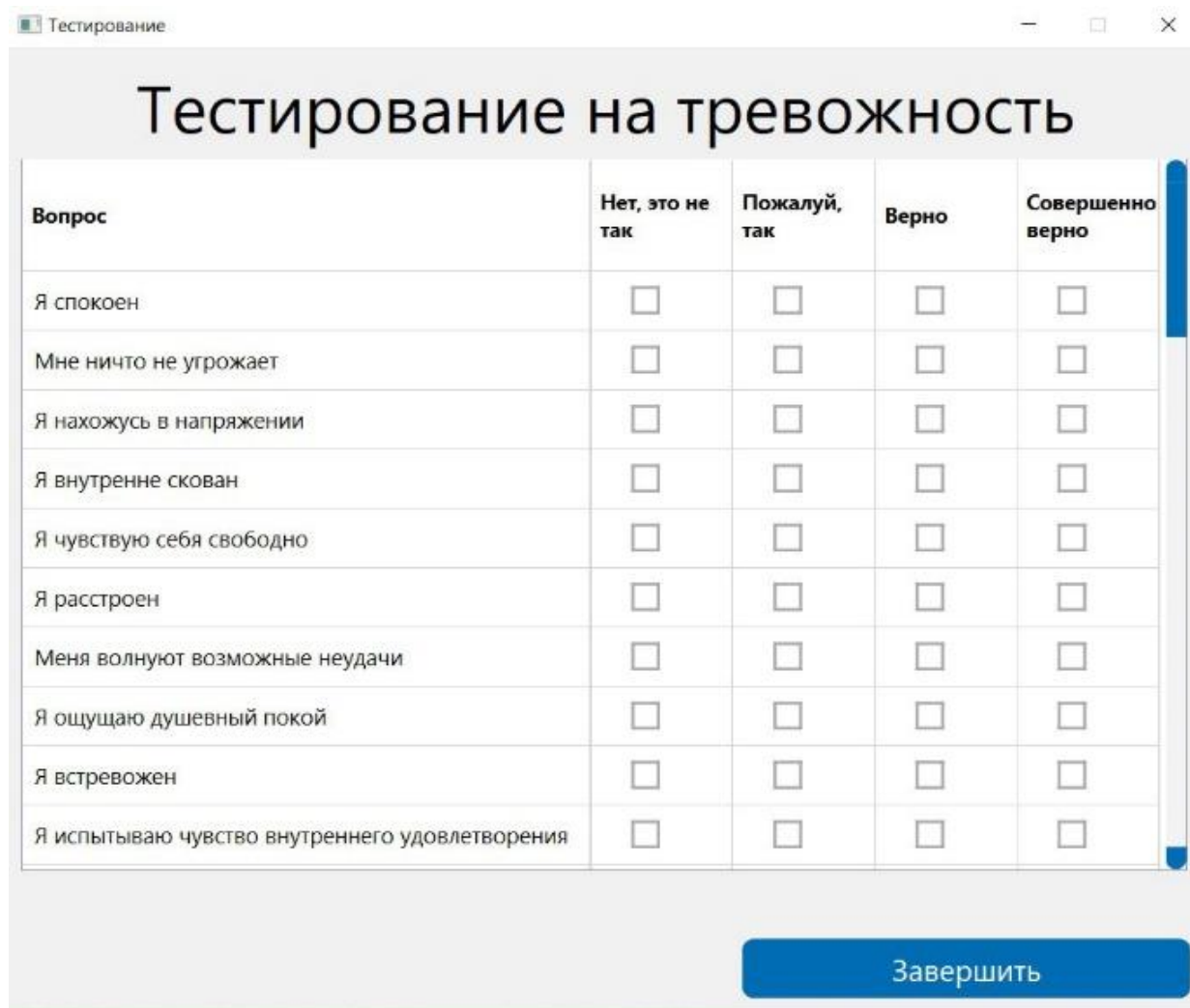
Рис. 2. ЭЭГ испытуемого по каналам Fp1, Fp2, T3, T4, O1, O2

Fig. 2. EEG of the subject by channels Fp1, Fp2, T3, T4, O1, O2

В результате проведенного эксперимента были получены результаты прохождения теста в виде баллов по шкале Спилбергера – Ханина и соответствующие им электроэнцефалограммы заты-

лочной части головного мозга каждого испытуемого.

Рассмотрим элементы интерфейса программы тестирования на тревожность по методу Спилбергера – Ханина (рис. 3).



Вопрос	Нет, это не так	Пожалуй, так	Верно	Совершенно верно
Я спокоен	☐	☐	☐	☐
Мне ничто не угрожает	☐	☐	☐	☐
Я нахожусь в напряжении	☐	☐	☐	☐
Я внутренне скован	☐	☐	☐	☐
Я чувствую себя свободно	☐	☐	☐	☐
Я расстроен	☐	☐	☐	☐
Меня волнуют возможные неудачи	☐	☐	☐	☐
Я ощущаю душевный покой	☐	☐	☐	☐
Я встревожен	☐	☐	☐	☐
Я испытываю чувство внутреннего удовлетворения	☐	☐	☐	☐

Завершить

Рис. 3. Элементы интерфейса программы тестирования на тревожность по методу Спилберга – Ханина

Fig. 3. User Interface elements of the anxiety testing software using the Spielberger – Khanin method

Электроэнцефалограмма имеет вид гармонического сигнала и мало пригодна в таком виде для сопоставления с результатами теста. Поэтому для исследования были выбраны следующие параметры сигнала электроэнцефалограммы: амплитуда минимальная и максимальная, частота минимальная и максимальная, медиана, математическое

ожидание (среднее), дисперсия, эксцесс, асимметрия, энергия сигнала.

Для изучения линейной взаимосвязи выбранных параметров сигнала электроэнцефалограммы с результатами тестирования по шкале личностной тревожности построили корреляционную матрицу в виде тепловой карты корреляций (рис. 4).

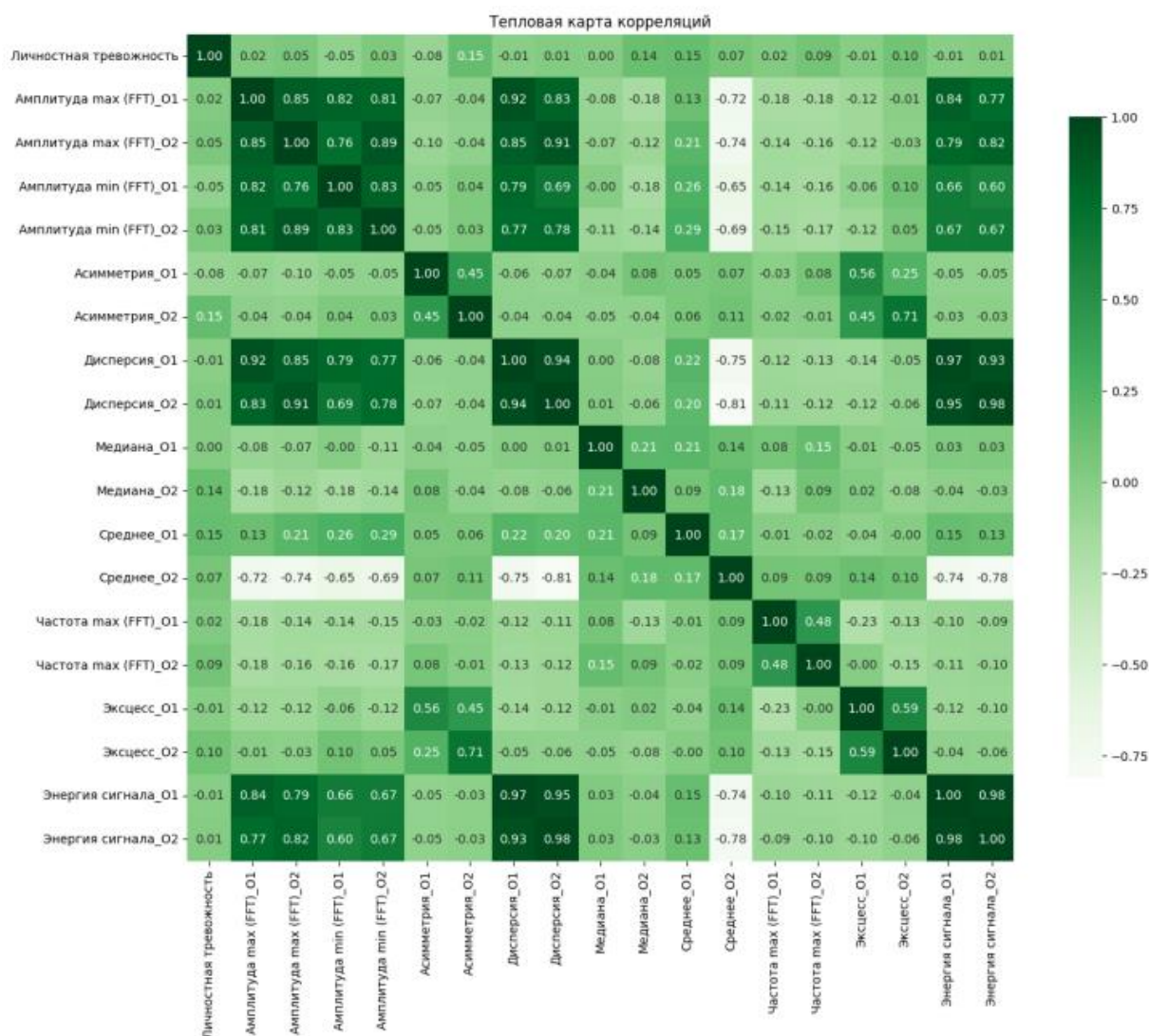


Рис. 4. Корреляционная матрица параметров сигналов ЭЭГ и личной тревожности

Fig. 4. Correlation matrix of EEG signal parameters and personal anxiety

Из полученной корреляционной матрицы следует, что между выбранными параметрами и баллами личностной тревожности наблюдается слабая линейная корреляционная зависимость, что говорит о необходимости продолжения дальнейших исследований с применением других способов определения взаимозависимости. Также из корреляционной матрицы видно, что между параметрами сигнала электроэнцефалограммы амплитудой минимальной, амплитудой максимальной, дисперсией и

энергией сигнала существует высокая линейная взаимосвязь, что необходимо учитывать в дальнейших исследованиях.

Нейросетевая методика исследования

В результате исследования параметров сигнала ЭКГ и оценки личной тревожности была выявлена линейная взаимосвязь. Таким образом, было принято решение о возможности использования для построения модели нейросетевых методов.

Для реализации нейросетевых методов обучения модели требуется предварительная подготовки данных. В результате проведения эксперимента, описанного выше, были получены данные в файлах формата .txt по результатам прохождения теста Спилбергега – Ханина и формата .edf по результатам похождения ЭЭГ. Для преобразования данных из формата .edf была разработана специальная библиотека для устройства NEUROPLAY-6C, позволяющая регистрировать данные ЭЭГ в формат .csv-файла в режиме реального времени. Также после окончания записи библиотека предоставляет возможность сохранения файла в формате .edf. Ниже приведены основные возможности библиотеки:

`search for ()` – возвращает объект `NeuroPlayDevice`, который содержит адрес устройства сети;

`validate_channels ()` – метод, возвращающий статус каналов (валидность данных);

`device.edf_creator.write_annotation()` – метод, позволяющий сделать метку с подписью на временном интервале в csv-файле.

После записи файл формата .csv содержит значения для каждого из 6 каналов с дискретизацией 125 ГЦ. Отметим, что в результате снятия ЭЭГ имеет место зашумленность каналов.

В последующем данные файла подвергались дополнительной обработке, а именно удалялись явные выбросы, т. е. значения, находящиеся вне диапазона $(-400; 400)$, и проводились сглаживания шумов в данных ЭЭГ с помощью фильтра Калмана для улучшения последующей обработки.

Так как сигнал ЭЭГ в общем виде (гармонический сигнал) невозможно сравнить с результатами тестирования

(числовое значение), данные были приведены к одному числовому виду. Для этого был сформирован файл со статистикой по каналам и баллами в виде файла формата .txt. В файле числовые данные ЭЭГ представим в виде числовых параметров сигнала, характеризующих процесс, таких как амплитуда минимальная, амплитуда максимальная, частота минимальная, частота максимальная, медиана, математическое ожидание (среднее), дисперсия, эксцесс, асимметрия, энергия сигнала. При нахождении амплитуд и частот сигнала ЭЭГ было применено быстрое преобразование Фурье библиотеки `scipy`. Данные, полученные после вычислений параметров сигнала ЭЭГ и в тесте Спилбергега – Ханина, сведены в файл в формате .csv-таблицы со статистикой по каждому проведенному испытанию.

Итоговая таблица состоит из величин для каналов O1 и O2, так как для дальнейших исследований выбраны именно эти каналы. После подготовки данных для разработки модели взаимодействия личной тревожности и ЭЭГ был использован ансамбль `CatBoost`. Стоит уточнить, что под ансамблем понимается метод машинного обучения, объединяющий несколько алгоритмов для улучшения предсказательной способности. `CatBoost` [21] – модель, разработанная компанией «Яндекс», основанная на алгоритме градиентного бустинга (минимизация функции потерь), использует комбинацию деревьев решений.

Для обучения были использованы данные из итоговой таблицы и следующие параметры:

– разделение выборки – 50 на 50 (так как набор данных состоит всего из 92 человек);

– количество итераций – 100;

- случайное распределение данных – 42;
- скорость обучения – 0,01;
- глубина обучения – 16;
- коэффициент регуляризации – 20;
- обучение происходило на GPU.

Ниже приведены полученные результаты работы модели. Средняя абсолютная ошибка составила 8,69 балла из

60 (14%), что говорит о качестве модели, так как ошибка не выходит за пределы определения класса. Средняя относительная ошибка составляет 19%, что тоже укладывается в пределах одного класса тревожности. На рисунке 5 представлена гистограмма распределения ошибок.

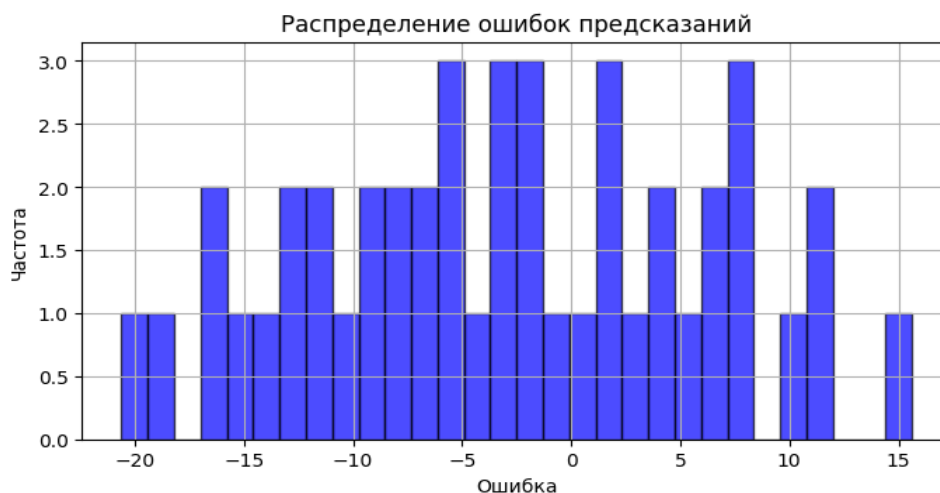


Рис. 5. Распределение ошибок

Fig. 5. Distribution of errors

Кроме того, стоит отметить, что при построении дерева решений можно определить влияние признаков на

конечный результат. На рисунке 6 представлено влияние признаков на результативность модели.



Рис. 6. Важность признаков модели

Fig. 6. Impact of Model Features

Результаты и их обсуждение

Проведенное исследование выявило зависимость между разными уровнями личностной тревожности по шкале Спилбергера – Ханина и видом электроэнцефалограммы у испытуемых, что дает возможность перехода от тестирования пациентов к снятию и интерпретации ЭЭГ. Также в ходе эксперимента выявлено, что распределение вероятности по классам тревожности имеет смещение вправо, и большая часть составляет третий класс тревожности, что видно из рисунка 7 для данных, рассчитанных и полученных экспериментальным путем. Можно заметить, что если проставлять ответы на вопросы случайным образом,

то с вероятностью 86% испытуемый попадет в третий класс.

В случае проверки тревожности с помощью ЭЭГ и разработанных алгоритмов в данной работе распределение смещается в стороны второго класса тревожности. В случае обследования тревожности с помощью тестов Спилбергера – Ханина наблюдается двойственная картина распределения, распределение сместилось влево во второй класс тревожности, но пик распределения остался в правой части в районе 3 класса тревожности. Отсюда можно предположить, что часть испытуемых из общей выборки проходили тест, выбирая ответы случайным образом.

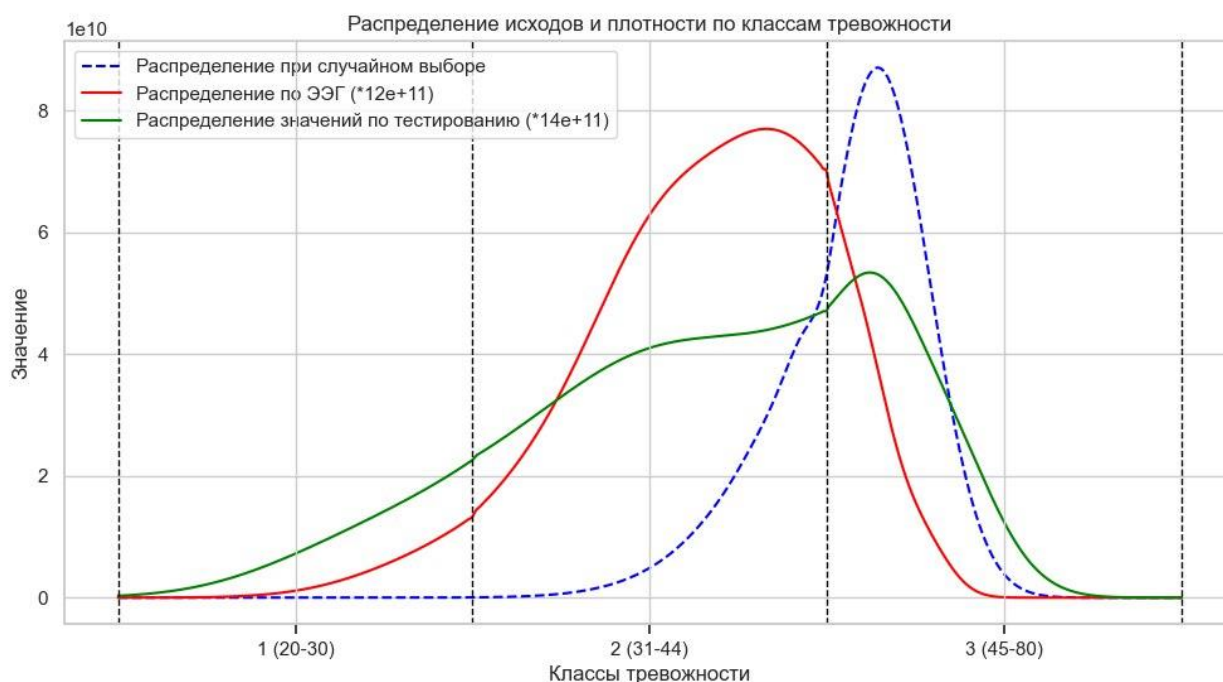


Рис. 7. Распределение вероятности по классам тревожности при случайной выборке, ЭЭГ и тестировании

Fig. 7. Probability distribution of anxiety classes in random sampling, EEG and testing

Выводы

В ходе проведенного исследования выявлена положительная зависимость

между разными уровнями личностной тревожности по шкале Спилбергера – Ханина и видом электроэнцефалограммы у

испытуемых с достаточной точностью. Также показано, что при определении тревожности возможно заменить тест, основанный на методике Спилбергера –

Ханина на определение тревожности по ЭЭГ с использованием предложенной методики.

Список литературы

1. Beauducel A., Brocke B., Leue A. Energetical bases of extraversion: effort, arousal, EEG, and performance // *Int J. Psychophysiol.* 2006. N 62(2). P. 212–223.
2. Wearable reduced-channel EEG system for remote seizure monitoring / M. A. Frankel, M. J. Lehmkuhle, M. C. Spitz, B. J. Newman, S. V. Richards, A. M. Arain // *Front. Neurol.* 2021. N 12. P. 728484. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.728484>. EDN OFZUVS
3. Журавлев Д. В. Аппаратура для электроэнцефалографических исследований / Воронежский государственный технический университет. Воронеж: ВорГТУ, 2021. 259 с.
4. Новикова С. И. Ритмы ЭЭГ и когнитивные процессы // *Психологическая наука и образование.* 2015. Т. 4, № 1. С. 91–108. EDN TZJDZX
5. Станкова Е. П., Мышкин И. Ю. Влияние индивидуальных характеристик ЭЭГ и психофизиологических особенностей на время реакции // *Научное обозрение. Биологические науки.* 2015. № 1. С. 151–152. EDN SBKXCZ
6. Аппаратно-программный комплекс для диагностики психофизиологического состояния человека в процессе решения когнитивных задач / А. В. Курбако, А. Н. Храмов, Е. И. Боровкова, Е. С. Дубинкина, Ю. М. Ишбулатов, В. И. Пономаренко, А. С. Караваев, М. Д. Прохоров // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика.* 2024. Т. 24. № 1. С. 19-29. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-19-29>. EDN UFAMDM
7. Муродов В., Халимова Ф. Т., Шумилина О. В. Сравнительная характеристика электрической активности мозга и степени тревожности // *Медицинский вестник Национальной академии наук Таджикистана.* 2022. Т. 12, № 4 (44). С. 34–39. EDN LBVXGE
8. Куликов В. Ю., Антропова Л. К. Особенности бета-ритма при закрытых и открытых глазах у умеренно и высокотренированных лиц // *Сибирский медицинский вестник.* 2021. № 3. С. 37–43. <https://doi.org/10.31549/2541-8289-2021-3-37-43>. EDN RFULKS
9. Корреляция мощности основных ритмов ЭЭГ и коэффициента когерентности с уровнем тревоги и депрессии в юношеском возрасте / К. А. Газенкамф, Н. А. Шнайдер, Д. В. Дмитренко, В. Е. Карнаухов, Д. А. Фирсова // *Вестник клинической нейрофизиологии.* 2018. № 5. С. 38–39. EDN FJQDGG
10. Изменение мощностных характеристик альфа-ритма у студентов с разным уровнем тревожности в условиях нормального сна и частичной депривации при решении задачи GO/NOGO / Е. А. Черемушкин, Н. Е. Петренко, Н. Н. Алипов, О. В. Сергеева // *Физиология человека.* 2022. Т. 48, № 2. С. 79–85. <https://doi.org/10.31857/S0131164622020047>. EDN TPRRDS

11. Влияние тревожности, связанной с экзаменационным стрессом, на смещение зрительного внимания и электрическую активность фронтальных зон мозга / А. П. Астащенко, Н. П. Горбатенко, Е. В. Дорохов, С. И. Варварова, П. В. Зяблова // Ульяновский медико-биологический журнал. 2020. № 2. С. 100–111. <https://doi.org/10.34014/2227-1848-2020-2-100-111>. EDN PGHPGQ
12. Попова Т. В., Корюкалов Ю. И., Коурова О. Г. Определение риска дезадаптации по электроэнцефалограмме для предупреждения психического перенапряжения // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. 2024. Т. 124, № 8. С. 97–102. <https://doi.org/10.17116/jnevro202412408197>. EDN NAXNJY
13. Связь личностной тревожности со спектрально-когерентными характеристиками А1-ритма электроэнцефалограммы человека / Н. А. Каратыгин, И. И. Коробейникова, Я. А. Венерина, Е. В. Бирюкова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 9. С. 91–97. EDN PEQDPV
14. Динамика спектральных характеристик ЭЭГ у лиц с разной личностной тревожностью при когнитивной деятельности / Т. Д. Джебраилова, И. И. Коробейникова, Н. А. Каратыгин, Е. В. Бирюкова, Я. А. Венерина // Физиология человека. 2021. Т. 47, № 1. С. 20–30. <https://doi.org/10.31857/S0131164621010033>. EDN AEIHVY
15. Спектральные характеристики ЭЭГ и концентрация гормонов в слюне у лиц с разной личностной тревожностью при когнитивной деятельности / Я. А. Венерина, Т. Д. Джебраилова, Н. А. Каратыгин, М. Ю. Будников // Психическое здоровье. 2021. № 8. С. 3–12. <https://doi.org/10.25557/2074-014X.2021.08.3-12>. EDN XXCVSH
16. Галкин С. А. Взаимосвязь между профилем ЭЭГ и клинико-психопатологическими особенностями пациентов с депрессивными расстройствами // Психическое здоровье. 2021. № 7. С. 43–48. EDN ZWOUFJ
17. Связь биоэлектрической активности мозга с клиническими особенностями течения депрессивных расстройств / С. А. Галкин, Г. Д. Ткачева, Т. А. Ошкина, С. Н. Васильева, О. В. Рощина, С. А. Иванова, Н. А. Бохан // Психическое здоровье. 2020. № 8. С. 16–21. <https://doi.org/10.25557/2074-014X.2020.08.16-21>. EDN PWDHMD
18. Manual for the State-Trait Anxiety Inventory (Form Y1 – Y2) / C. D. Spielberger, R. Gorsuch, R. E. Lushene, P. R. Vagg. CA: Consulting Psychologists Press, 1983.
19. Ханин Ю. Л. Краткое руководство к шкале реактивной и личностной тревожности Ч. Д. Спилбергера. Ленинград, 1976. 18 с.
20. NEUROPLAY-6C. Универсальная 6-канальная нейрогарнитура с нейроиграми. URL: <https://neuroplay.ru/catalog/neuroplay-6c/> (дата обращения: 17.03.2025).
21. Catboost: Unbiased boosting with categorical features / L. Prokhorenkova, G. Gusev, A. Vorobev [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems. URL: <https://arxiv.org/pdf/1706.09516> (дата обращения: 17.03.2025).

References

1. Beauducel A., Brocke B., Leue A. Energetical bases of extraversion: effort, arousal, EEG, and performance. *Int J. Psychophysiol.* 2006;(62):212–223.
2. Frankel M.A., Lehmkuhle M.J., Spitz M.C., Newman B.J., Richards S.V., Arain A.M. Wearable reduced-channel EEG system for remote seizure monitoring. *Front. Neurol.* 2021;(12):728484. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.728484>. EDN OFZUVS
3. Zhuravlev D.V. Equipment for electroencephalographic research. Voronezh: Voronezh State Technical University; 2021. 259 p. (In Russ.)
4. Novikova S.I. EEG rhythms and cognitive processes. *Psikhologicheskaya nauka i obrazovanie = Psychological Science and Education.* 2015;4(1):91–108. (In Russ.) EDN TZJDZX
5. Stankova E.P., Myshkin I.Yu. The influence of individual EEG characteristics and psychophysiological features on reaction time. *Nauchnoe obozrenie. Biologicheskie nauki = Scientific Review. Biological Sciences.* 2015;(1):151–152. (In Russ.) EDN SBKXCZ
6. Kurbako A.V., Khramkov A.N., Borovkova E.I., Dubinkina E.S., Ishbulatov Yu.M., Ponomarenko V.I., Karavaev A.S., Prokhorov M.D. Hardware and software complex for diagnosing the psychophysiological state of a person in the process of solving cognitive problems. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Fizika = Proceedings of the Saratov University. A New Family. Series: Physics.* 2024;4(1):19–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-19-29>. EDN UFAMDM
7. Murodov V., Halimova F.T., Shumilina O.V. Comparative characteristics of the electrical activity of the brain and the degree of anxiety. *Meditinskii vestnik Natsional'noi akademii nauk Tadzhikistana = Medical Bulletin of the National Academy of Sciences of Tajikistan.* 2022;12(4):34–39. (In Russ.) EDN LBVXGE
8. Kulikov V.Yu., Antropova L.K. Features of beta rhythm with closed and open eyes in moderately and highly anxious individuals. *Sibirskii meditsinskii vestnik = Siberian Medical Bulletin.* 2021;(3):37–43. (In Russ.) <https://doi.org/10.31549/2541-8289-2021-3-37-43>. EDN RFULKS
9. Gazenkampf K.A., Schneider N.A., Dmitrenko D.V., Karnaukhov V.E., Firsova D.A. Correlation of the power of the main EEG rhythms and the coherence coefficient with the level of anxiety and depression in adolescence. *Vestnik klinicheskoi neurofiziologii = Bulletin of Clinical Neurophysiology.* 2018;(S):38–39. (In Russ.) EDN FJQDGG
10. Cheremushkin E.A., Petrenko N.E., Alipov N.N., Sergeeva O.V. Changes in the power characteristics of the alpha rhythm in students with different levels of anxiety in conditions of normal sleep and partial deprivation when solving the GO/NOGO problem. *Fiziologiya cheloveka = Human Physiology.* 2022;48(2):79–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0131164622020047>. EDN TPRRDS
11. Astashchenko A.P., Gorbatenko N.P., Dorokhov E.V., Varvarova S.I., Zyablova P.V. The influence of anxiety associated with exam stress on the movement of visual attention and electrical activity of the frontal areas of the brain. *Ul'yanovskii mediko-biologicheskii*

zhurnal = *Ulyanovsk Medical and Biological Journal*. 2020;(2):100–111. (In Russ.) <https://doi.org/10.34014/2227-1848-2020-2-100-111>. EDN PGHPGQ

12. Popova T.V., Koryukalov Yu.I., Kourova O.G. Determination of the risk of maladaptation by electroencephalogram for the prevention of mental overexertion. *Zhurnal neurologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova* = *Journal of Neurology and Psychiatry named after S.S. Korsakov*. 2024;124(8):97–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.17116/jnevro202412408197>. EDN NAXNJY

13. Karatygin N.A., Korobeynikova I.I., Venerina Ya.A., Biryukova E.V. The relationship of personal anxiety with the spectrally coherent characteristics of the A1 rhythm of the human electroencephalogram. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* = *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2018;(9):91–97. (In Russ.) EDN PEQDPV

14. Dzhebrailova T.D., Korobeynikova I.I., Karatygin N.A., Biryukova E.V., Venerina Ya.A. Dynamics of spectral EEG characteristics in individuals with different personal needs during cognitive activity. *Fiziologiya cheloveka* = *Human Physiology*. 2021;47(1):20–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0131164621010033>. EDN AEIHVY

15. Venerina Ya.A., Dzhebrailova T.D., Karatygin N.A., Budnikov M.Y. Spectral characteristics of the EEG and the concentration of hormones in saliva in individuals with different personality anxiety during cognitive activity. *Psikhicheskoe zdorov'e* = *Mental Health*. 2021;(8):3–12. (In Russ.) <https://doi.org/10.25557/2074-014X.2021.08.3-12>. EDN XXCVSH

16. Galkin S.A. The relationship between the EEG profile and the clinical and psychopathological characteristics of patients with depressive disorders. *Psikhicheskoe zdorov'e* = *Mental Health*. 2021;(7):43–48. (In Russ.) EDN ZWOUFJ

17. Galkin S.A., Tkacheva G.D., Oshkina T.A., Vasilyeva S.N., Roshchina O.V., Ivanova S.A., Bohan N.A. The connection of bioelectric brain activity with the clinical features of the course of depressive disorders. *Psikhicheskoe zdorov'e* = *Mental Health*. 2020;(8):16–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.25557/2074-014X.2020.08.16-21>. EDN PWDHMD

18. Spiel-berger C.D., Gorsuch R., Lushene R.E., Vagg P.R. Manual for the State-Trait Anxiety Inventory (Form Y1 – Y2). CA: Consulting Psychologists Press; 1983.

19. Khanin Yu.L. A brief guide to the scale of reactive and personal anxiety by C.D. Spiel-berger. Leningrad; 1976. 18 p. (In Russ.)

20. NEUROPLAY-6C. Universal 6-channel neural headset with neural games. (In Russ.) Available at: <https://neuroplay.ru/catalog/neuroplay-6c/> (accessed 17.03.2025).

21. Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A., et al. Catboost: Unbiased boosting with categorical features. *Advances in Neural Information Processing Systems*. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1706.09516> (accessed 17.03.2025).

Информация об авторах / Information about the Authors

Авсиевич Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры медицинской физики, математики и информатики, Самарский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Самара, Российская Федерация, e-mail: a.v.avsievich@samsmu.ru, SPIN: 1516-3252, ORCID: 0000-0001-5778-3438

Alexandr V. Avsievich, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Medical Physics, Mathematics and Informatics, Samara State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Samara, Russian Federation, e-mail: a.v.avsievich@samsmu.ru, SPIN: 1516-3252, ORCID: 0000-0001-5778-3438

Жейков Денис Сергеевич, врач-психиатр, Передовая медицинская инженерная школа, Самарский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Самара, Российская Федерация, e-mail: d.s.zhejkov@samsmu.ru, SPIN: 5664-6904, ORCID: 0009-0008-6024-0539

Denis S. Zhejkov, Psychiatrist, Higher School of Medical Engineering, Samara State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Samara, Russian Federation, e-mail: d.s.zhejkov@samsmu.ru, SPIN: 5664-6904, ORCID: 0009-0008-6024-0539

Иващенко Антон Владимирович, доктор технических наук, профессор, директор, Передовая медицинская инженерная школа, Самарский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Самара, Российская Федерация, e-mail: anton.ivashenko@gmail.com, SPIN: 3707-6260, ORCID: 0000-0001-7766-3011

Anton V. Ivaschenko, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Director, Higher School of Medical Engineering, Samara State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Samara, Russian Federation, e-mail: anton.ivashenko@gmail.com, SPIN: 3707-6260, ORCID: 0000-0001-7766-3011

Авсиевич Владимир Викторович, кандидат технических наук, доцент, Передовая медицинская инженерная школа, Самарский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Самара, Российская Федерация, e-mail: avsievichv@gmail.com, SPIN: 5159-7644, ORCID: 0000-0002-4218-5176

Vladimir V. Avsievich, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Higher School of Medical Engineering, Samara State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Samara, Russian Federation, e-mail: avsievichv@gmail.com, SPIN: 5159-7644, ORCID: 0000-0002-4218-5176

Широков Илья Антонович, магистрант,
Передовая медицинская инженерная школа,
Самарский государственный медицинский
университет Министерства здравоохранения
Российской Федерации,
г. Самара, Российская Федерация,
e-mail: i.a.shirokov@samsmu.ru,
ORCID: 0009-0002-9397-7138

Пономарев Артем Евгеньевич, магистрант,
Передовая медицинская инженерная школа,
Самарский государственный медицинский
университет Министерства здравоохранения
Российской Федерации,
г. Самара, Российская Федерация,
e-mail: a.e.ponomonarev@samsmu.ru

Заров Евгений Владимирович, магистрант,
Передовая медицинская инженерная школа,
Самарский государственный медицинский
университет Министерства здравоохранения
Российской Федерации,
г. Самара, Российская Федерация,
e-mail: e.v.zarov@samsmu.ru

Колсанов Александр Владимирович, доктор
медицинских наук, профессор Российской
академии наук, профессор, Самарский
государственный медицинский университет
Министерства здравоохранения Российской
Федерация, г. Самара, Российская Федерация,
e-mail info@samsmu.ru,
SPIN: 2028-6609,
ORCID: 0000-0002-4144-7090

Ilya A. Shirokov, Undergraduate, Higher School
of Medical Engineering, Samara State Medical
University of the Ministry of Health of the Russian
Federation, Samara, Russian Federation,
e-mail: i.a.shirokov@samsmu.ru,
ORCID: 0009-0002-9397-7138

Artem E. Ponomarev, Undergraduate, Higher
School of Medical Engineering, Samara State
Medical University of the Ministry of Health of
the Russian Federation,
Samara, Russian Federation,
e-mail: a.e.ponomonarev@samsmu.ru

Evgeny V. Zarov, Undergraduate, Higher School
of Medical Engineering, Samara State Medical
University of the Ministry of Health of the Russian
Federation, Samara, Russian Federation,
e-mail: e.v.zarov@samsmu.ru

Alexander V. Kolsanov, Doctor of Sciences
(Medical), Professor of the Russian Academy
of Sciences, Professor, Samara State Medical
University of the Ministry of Health,
of the Russian Federation,
Samara, Russian Federation,
e-mail info@samsmu.ru,
SPIN: 2028-6609,
ORCID: 0000-0002-4144-7090

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-25-45>

УДК 691.326

Специализированная многофункциональная онлайн-платформа для формирования цифровой карьерной среды вуза

Т. И. Лапина¹ ✉, О. С. Хиневич¹, Е. А. Петрик¹, Е. А. Коломиец¹

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

✉ e-mail: lapinati@mail.ru

Резюме

Цель исследования. В настоящее время трудоустройство выпускников вузов является не только проблемой выпускников, но и проблемой самих высших учебных заведений. Востребованность специалистов на рынке труда рассматривается как показатель качества образования и обеспечивает рейтинг вуза.

Потребность в специалистах на рынке труда велика, однако не всегда удается обеспечить запросы предприятий, несмотря на то, что вузы ежегодно выпускают сотни выпускников. Данное противоречие возникает вследствие отсутствия прямого взаимодействия выпускников и работодателей.

Для устранения данного противоречия требуется разработка специализированной многофункциональной онлайн-платформы, которая позволит наладить процесс мониторинга трудоустройства выпускников и установить прямое взаимодействие между центрами карьеры вуза, выпускниками и работодателями.

В работе рассмотрен системный подход к созданию и разработана многофункциональная онлайн-платформы, которая позволяет эффективно содействовать трудоустройству выпускников университета.

Методы. При создании разработки проекта использованы методы системного анализа, методы проектирования программных средств, унифицированный язык Unified Modeling Language, СУБД SQLServer, среда разработки JavaScript, Node.js, Vue.js.

Результаты. В ходе выполнения проекта разработано программное обеспечение многофункциональной онлайн-платформы, которая обеспечивает прямое взаимодействие между центрами карьеры вуза, выпускниками и работодателями.

Заключение. Разработанная специализированная многофункциональная онлайн-платформа имеет отдельные кабинеты: для вуза, для работодателя, выпускника, позволяет наладить процесс мониторинга трудоустройства выпускников и установить прямое взаимодействие между центрами карьеры вуза, выпускниками и работодателями. Система полностью готова к использованию и будет способствовать формированию цифровой карьерной среды вуза.

Ключевые слова: веб-приложение; трудоустройство выпускников; автоматизация деятельности вуза.

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

Для цитирования: Специализированная многофункциональная онлайн-платформа для формирования цифровой карьерной среды вуза / Т. И. Лапина, О. С. Хиневич, Е. А. Петрик, Е. А. Коломиец // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 2. С. 25–45. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-25-45>

Поступила в редакцию 11.04.2025

Подписана в печать 10.05.2025

Опубликована 30.06.2025

A specialized multifunctional online platform for the formation of a university's digital career environment

Tatyana I. Lapina¹✉, Olga S. Khinevich¹, Elena A. Petrik¹, Elena A. Kolomiets

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

✉ e-mail: lapinati@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Currently, the employment of university graduates is not only a problem for graduates, but also a problem for the higher education institutions themselves. The demand for specialists in the labor market is considered an indicator of the quality of education and ensures the rating of the university.

The need for specialists in the labor market is great, but it is not always possible to meet the demands of enterprises, despite the fact that universities annually graduate hundreds of graduates. This contradiction arises due to the lack of direct interaction between graduates and employers.

This contradiction can be resolved by using a specialized multifunctional online platform, which allows you to establish a process of monitoring the employment of graduates and establish direct interaction between university career centers, graduates and employers.

The paper considers an approach to creating a multifunctional online platform that can effectively facilitate the employment of university graduates..

Methods. In creating the project development, methods of system analysis, methods of designing software tools, the unified language Unified Modeling Language, SQLServer DBMS, JavaScript development environment, Node.js, Vue.js were used.

Results. During the project, software was developed for a multifunctional online platform that ensures direct interaction between the university's career centers, graduates and employers.

Conclusion. The developed specialized multifunctional online platform has separate offices: for the university, for the employer, for the graduate, allows to establish the process of monitoring the employment of graduates and establish direct interaction between the university career centers, graduates and employers. The system is completely ready for use, and will contribute to the formation of a digital career environment of the university.

Keywords: web application; graduate employment; automation of university activities.

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., Khinevich O.S., Petrik E.A., Kolomiets E.A. A specialized multifunctional online platform for the formation of a university's digital career environment. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2025;15(2):25–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-25-45>

Received 11.04.2025

Accepted 10.05.2025

Published 30.06.2025

Введение

В настоящее время трудоустройство выпускников вузов является не только проблемой выпускников, но и проблемой самих высших учебных заведений.

Каждый вуз является субъектом двух рынков: рынка образовательных услуг и рынка труда специалистов, деятельность которых тесно взаимосвязана [1]. На сегодняшний день показатель успешной

работы выпускников по полученной специальности – один из главных критериев оценки эффективности работы учебного заведения. Востребованность молодых специалистов на рынке труда рассматривается как показатель качества образования, дает вузу конкурентное преимущество и высокий рейтинг среди других учебных заведений, что обеспечивает востребованность среди абитуриентов¹.

Потребность в специалистах на рынке труда велика. Однако не всегда удается обеспечить запросы предприятий, несмотря на то, что вузы ежегодно выпускают сотни выпускников².

В структуре вуза предусмотрены подразделения, центры карьеры, обеспечивающие взаимодействие с работодателями и информирование выпускников, однако количество их контактов с работодателями весьма ограничено [2].

Решить данное противоречие позволяет использование специализированной многофункциональной онлайн-платформы, которая позволяет наладить процесс мониторинга трудоустройства выпускников и установить прямое взаимодействие между центрами карьеры, выпускниками вуза и работодателями³.

В работе рассмотрен процесс и реализация многофункциональной онлайн-платформы, которая обеспечивает прямое взаимодействие «вуз – выпускник – центр карьеры – работодатель» и позволяет эффективно содействовать

трудоустройству выпускников университета. Предлагаемый механизм взаимодействия обеспечивает предоставление достоверной и полной информации о вакансиях напрямую от работодателя, от компаний, которые сотрудничают с университетом и заинтересованы в принятии молодых специалистов на работу. С другой стороны, работодатели могут просматривать данные о выпускниках, проводя анализ и отбор предполагаемых кандидатов⁴.

Для сотрудников центра карьеры вуза данная система позволит вести учет и статистику трудоустроенных выпускников, вакансий, работодателей и будет способствовать формированию цифровой карьерной среды вуза.

Материалы и методы

В настоящее время имеется ряд программных web-систем, оказывающих информационную поддержку специалистам при поиске вакансий.

Примером может служить автоматизированная информационная система содействия трудоустройству выпускников, бесплатно распространяемая Министерством образования и науки РФ во всех образовательных учреждениях профессионального образования Российской Федерации с целью совершенствования механизмов содействия трудоустройству выпускников учреждений профессионального образования и профессиональной ориентации молодежи с

¹ Юго-Западный государственный университет. URL: <https://swsu.ru> (дата обращения: 05.03.2025).

² Сервис онлайн-образования Яндекс Практикум. URL: <https://practicum.yandex.ru/> (дата обращения: 08.03.2025).

³ METANIT.COM: сайт о программировании [Электронный ресурс]. URL: <https://metanit.com/>

ysclid=maxrzl5dac96117 6211 (дата обращения: 07.03.2025).

⁴ Научная электронная библиотека «КиберЛенинка». URL: <https://cyberleninka.ru/?ysclid=maxs3dzllm475508397> (дата обращения: 09.03.2025).

учетом спроса на рынке труда¹. Другими примерами могут быть автоматизированная система трудоустройства Scillbook², web-приложение «БАЗИС: Трудоустройство» и пр.³

Но данные ресурсы предназначены для поиска вакансий применительно для всей территории РФ, тогда как задача стоит в обеспечении специалистами предприятий своего региона. Кроме того, как правило, данные средства имеют недостаток, связанный с оперативным доступом и обновлением информации как работодателями, так и соискателями вакансий, сотрудниками служб трудоустройства и другими зарегистрированными пользователями [3].

В предлагаемой многофункциональной онлайн-платформе в отличие от рассмотренных выше аналогов учтены все недостатки: созданы личные кабинеты для работодателей, студентов; создан понятный интерфейс пользователя; реализована функция расширенного поиска; добавлен просмотр статистики, рассылка уведомлений, страница новостями.

В данной работе для реализации проекта многофункциональной онлайн-платформы используются методологии IDEF, DFD, UML и инструментальные средства проектирования [4].

Программный проект состоит из клиентской и серверной частей и реализует технологию «клиент-сервер». Клиентская часть представляет собой пользовательский интерфейс, откуда

формируются запросы к серверу и обрабатываются ответы от него. Серверная часть получает запрос от клиента, выполняет вычисления, после этого формирует веб-страницу и отправляет её клиенту по сети с использованием протокола HTTP [5].

Для разработки клиентской части веб-приложения используется язык разметки HTML, каскадные таблицы стилей CSS и язык программирования JavaScript. Для написания CSS стилей для проектируемого приложения используется препроцессор SCSS. Он дает дополнительные возможности: переменные, вложенные селекторы и медиазапросы, миксины, наследование и другие полезные вещи, которые упрощают и структурируют работу с CSS-кодом [6].

Для создания интерфейса используется технология CSS – Flexbox, разработанная специально для упрощения создания адаптивных, гибких сайтов и веб-приложений [7].

Для создания и организации компонентов интерфейса SPA используется фреймворк Vue.js. Структура веб-страницы описывается с помощью объектной модели документа (DOM). Vue.js использует виртуальный DOM, который является легковесной копией DOM. Изменения данных в приложении вначале вносятся в виртуальный DOM, а потом Vue выбирает минимальный набор компонентов, для которых надо выполнить изменения на веб-странице, чтобы реальный DOM соответствовал виртуальному.

¹ Научная электронная библиотека «КиберЛенинка». URL: <https://cyberleninka.ru/?ysclid=maxs3dzllm475508397> (дата обращения: 09.03.2025).

² Scillbook. Автоматизированная система трудоустройства выпускников БГТУ им. В. Г. Шухова

URL: <https://skillbook.bstu.ru/?ysclid=maxsa2jc45625765306> (дата обращения: 10.03.2025).

³ Сервис онлайн-образования Яндекс Практикум. URL: <https://practicum.yandex.ru/> (дата обращения: 08.03.2025).

Применение такого подхода дает возможность повысить производительность приложения [8].

Кроме того, для разработки web-приложения необходимы дополнительные модули Vue.js Vue-Router и Vuex. Vue-Router – система маршрутизации, которая позволяет сопоставлять запросы к приложению с определенными компонентами. Vuex – библиотека для осуществления централизованного хранения данных для всех компонентов приложения [9].

Для серверной части веб-приложения выбрана серверная платформа Node.js. Она работает на средстве Google Chrome – V8, которое позволяет компилировать код JavaScript в машинный код. В качестве сторонних библиотек в серверной части задействуются Express, Mongoose, JSON Web Token.

Express – фреймворк для упрощения работы с маршрутизацией, отрисовки шаблонов, обработки поступающих на

сервер запросов и генерации ответов [10].

Mongoose – это библиотека JavaScript, позволяющая определять схемы со строго типизированными данными, абстрагируясь от доступа к MongoDB.

JSON Web Token (JWT) – это библиотека открытого стандарта для создания токенов доступа, основанного на формате JSON.

Для обеспечения функции хранения данных использована No SQL СУБД MongoDB. В отличие от реляционных БД MongoDB предлагает документо-ориентированную модель данных, благодаря чему она работает быстрее, обладает лучшей масштабируемостью и является более простой в использовании [11].

Модель потоков данных в нотации DFD (рис. 1) наглядно показывает функции и движение информации в пределах процесса или системы [12].

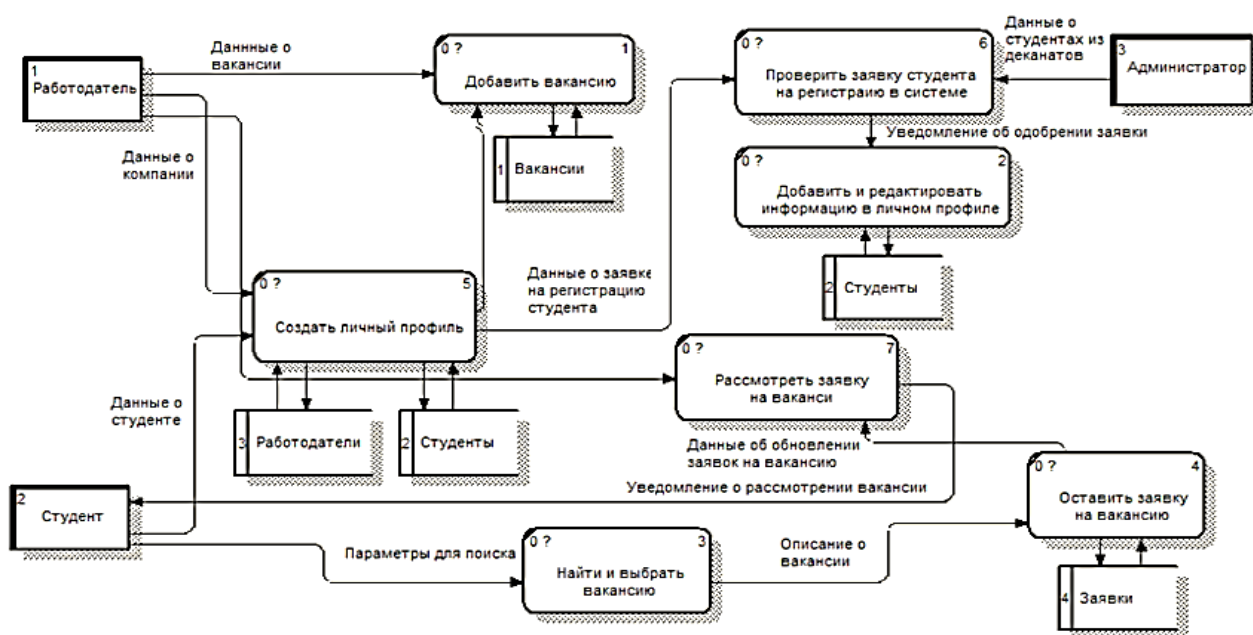


Рис. 1. Модель потоков данных в нотации DFD

Fig. 1. Data flow model in DFD notation

Анализ функциональности разрабатываемого проекта проведен на основе [12].

Рассмотрим диаграммы вариантов использования (UseCase Diagram) (рис. 2).

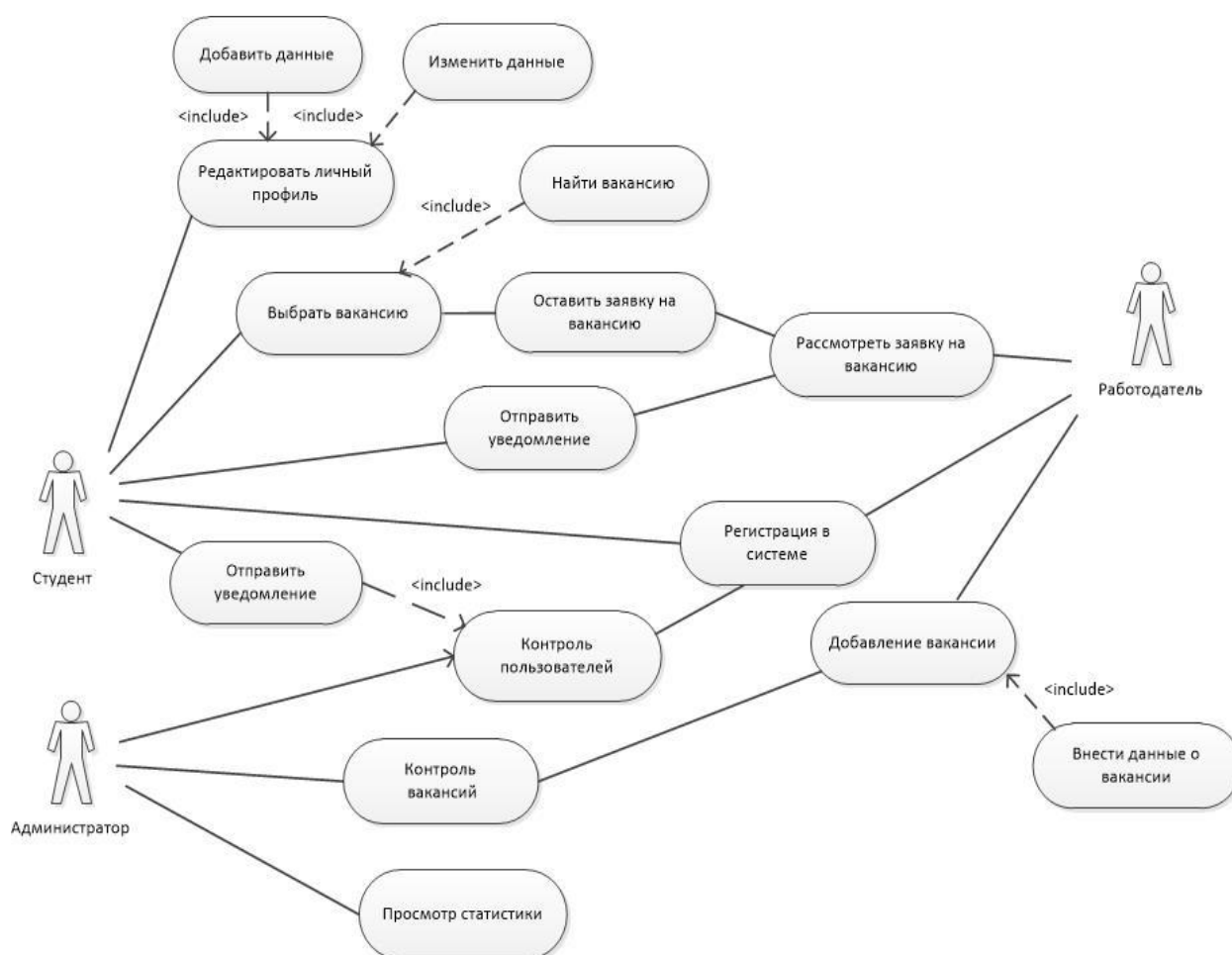


Рис. 2. Диаграмма вариантов использования

Fig. 2. Use Case Diagram

Моделирование поведения системы выполнено на основе диаграмм активности (ActivityDiagram), которые отражают динамические аспекты поведения системы и представляет собой блок-схему, которая наглядно показывает, как поток управления переходит от одной деятельности к другой [13].

Пример диаграмма активности для выбора, оставления заявки на вакансию соискателями и рассмотрение ее работодателем приведен ниже (рис. 3).

Диаграммы классов в объектно ориентированных системах показывают набор объектов системы, интерфейсов и их связей (рис. 4).

Описание взаимодействия программных объектов системы выполнено с помощью диаграммы последовательностей, которая содержит объекты, взаимодействующие в рамках сценария вариантов использования, сообщения, которыми они обмениваются, и возвращаемые результаты, связанные с сообщениями [12].

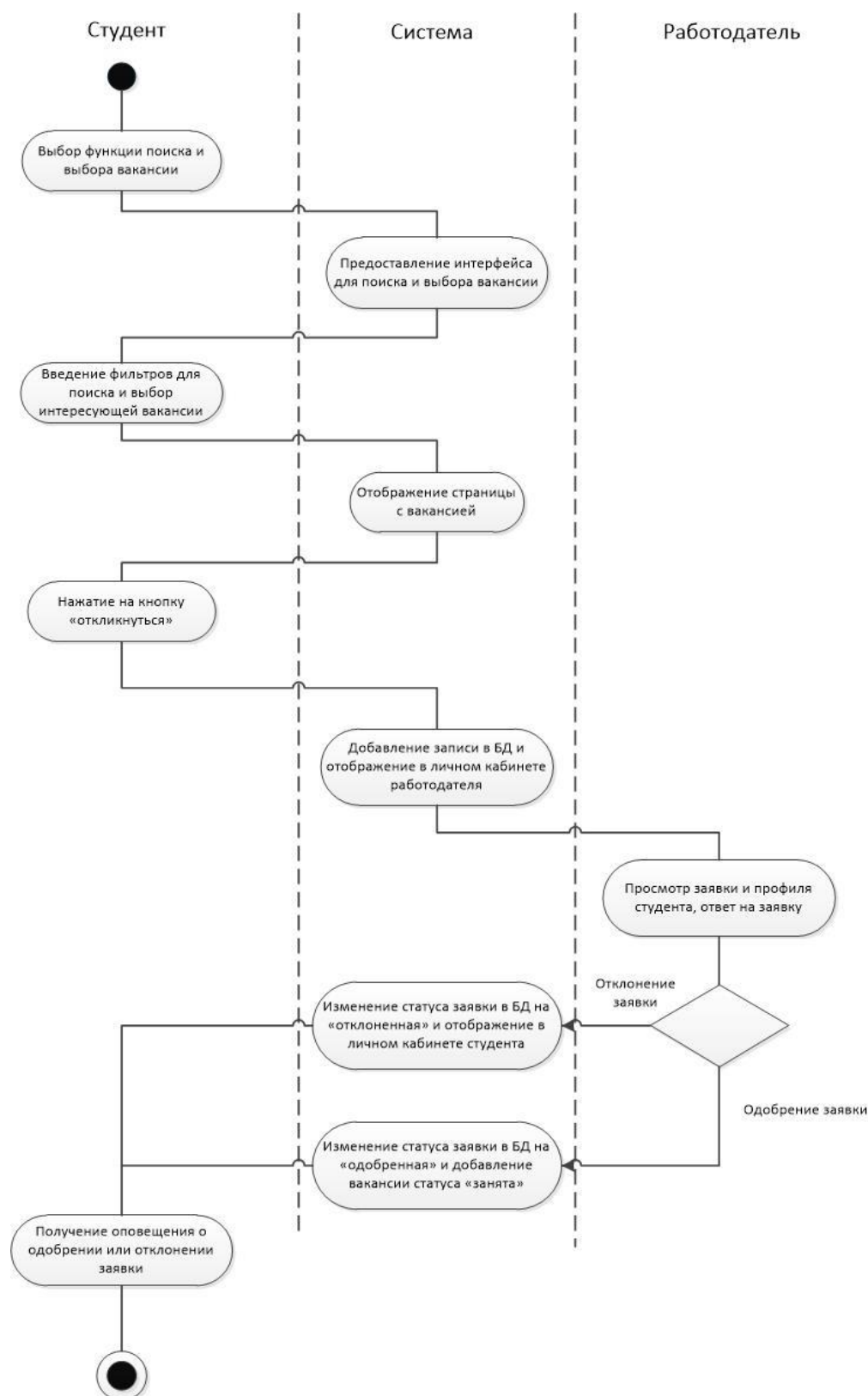


Рис. 3. Диаграмма активности для выбора, оставления заявки на вакансию соискателями и рассмотрение ее работодателем

Fig. 3. Activity diagram for selection, submission of an application for a vacancy by applicants and its consideration by the employer

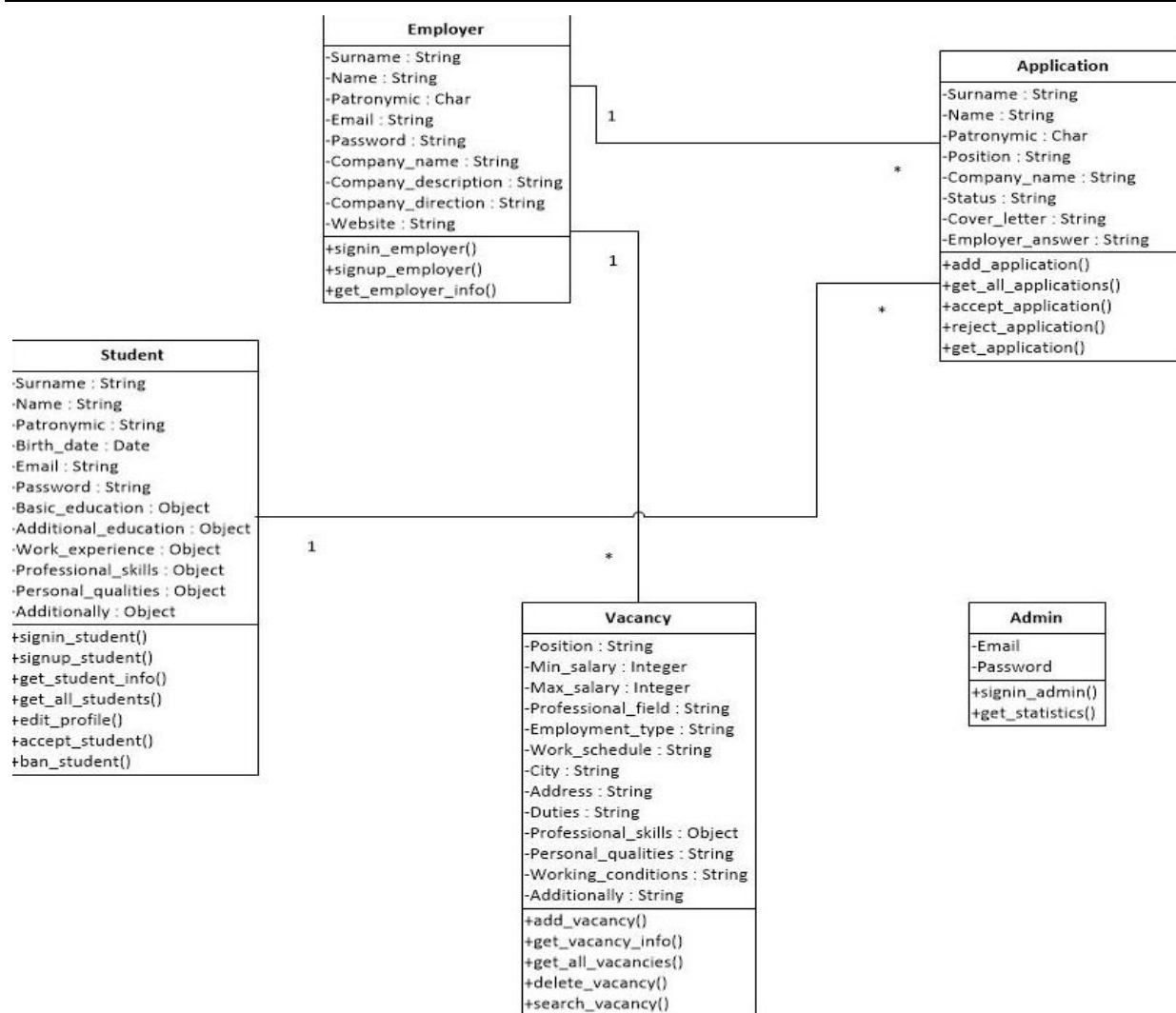


Рис. 4. Диаграмма классов

Fig. 4. Class diagram

Рассмотрим пример диаграммы последовательностей регистрации выпускника (рис. 5).

Модель данных прокта реализована в NoSQL, структуры данных которой отличаются от структур данных, используемых реляционными БД. В результате эти базы данных и получили название NoSQL (база данных с неструктурированными данными). Базы данных NoSQL можно масштабировать на несколько серверов, хотя иногда и с потерей согласованности данных.

Использование NoSQL баз данных в данном случае обосновано тем, что в проекте предполагается использование больших наборов распределенных данных для хранения и аналитики.

СУБД MongoDB манипулирует документами, а не строками данных, как реляционных БД. Документ представляет собой хранилище ключей и значений, а информация в документах может иметь произвольную структуру [6].

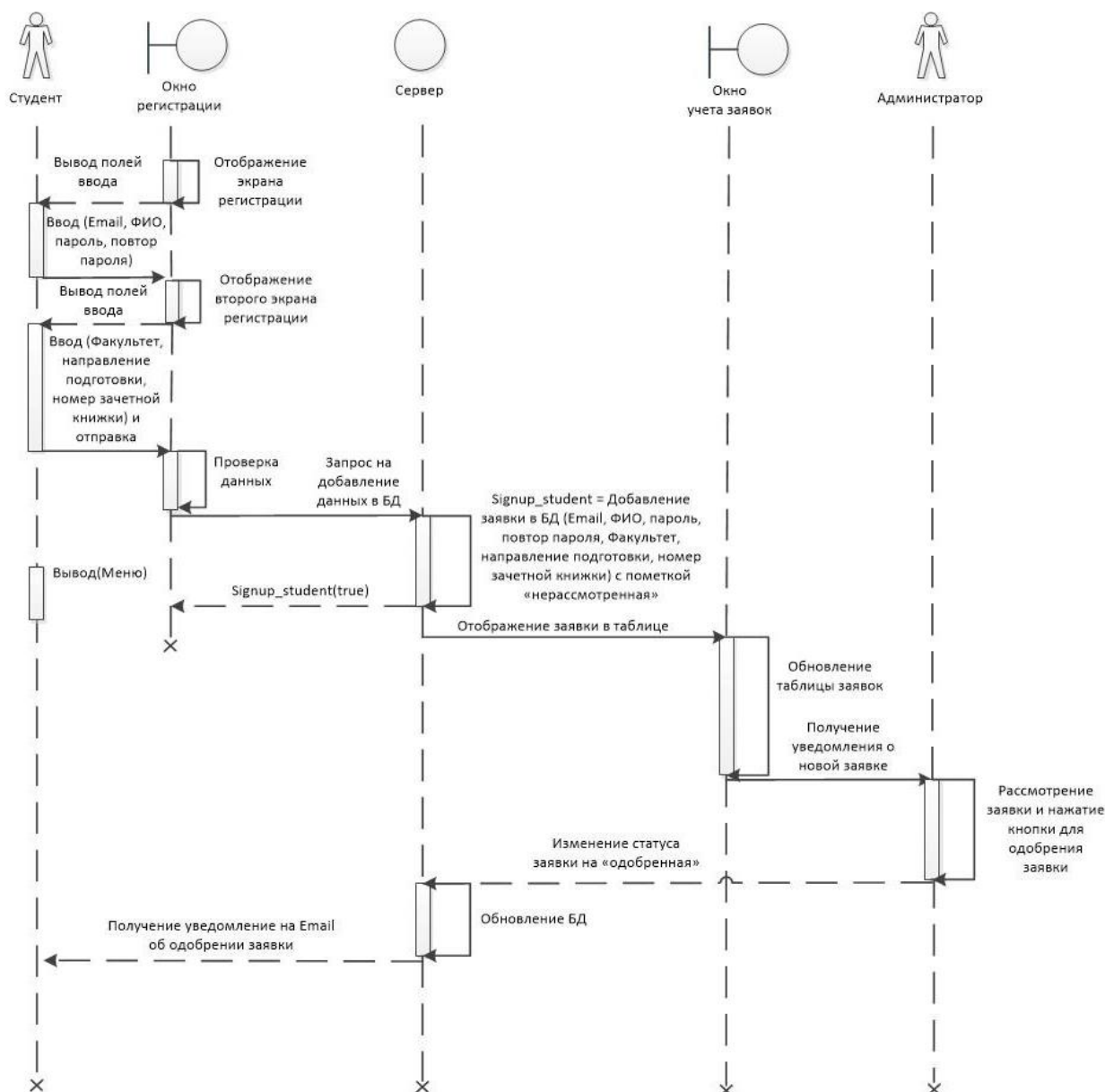


Рис. 5. Диаграмма последовательности регистрации выпускника

Fig. 5. Graduate Registration Sequence Diagram

Способ хранения данных в MongoDB имеет сходство со стандартов обмена данными и их хранения JSON (JavaScript Object Notation) и называется BSON (сокращение от binary JSON) [14].

Схема модели данных приведена ниже (рис. 6).

На рисунке 7 проведен пример входа в систему и процедура регистрации нового пользователя [14].

Первая часть регистрации работодателя происходит аналогично регистрации выпускника. При выборе режима «Работодатель» пользователь заполняет данные: название компании, сфера деятельности (выбирается из выпадающего списка), описание компании и ссылка на веб-сайт (рис. 8).

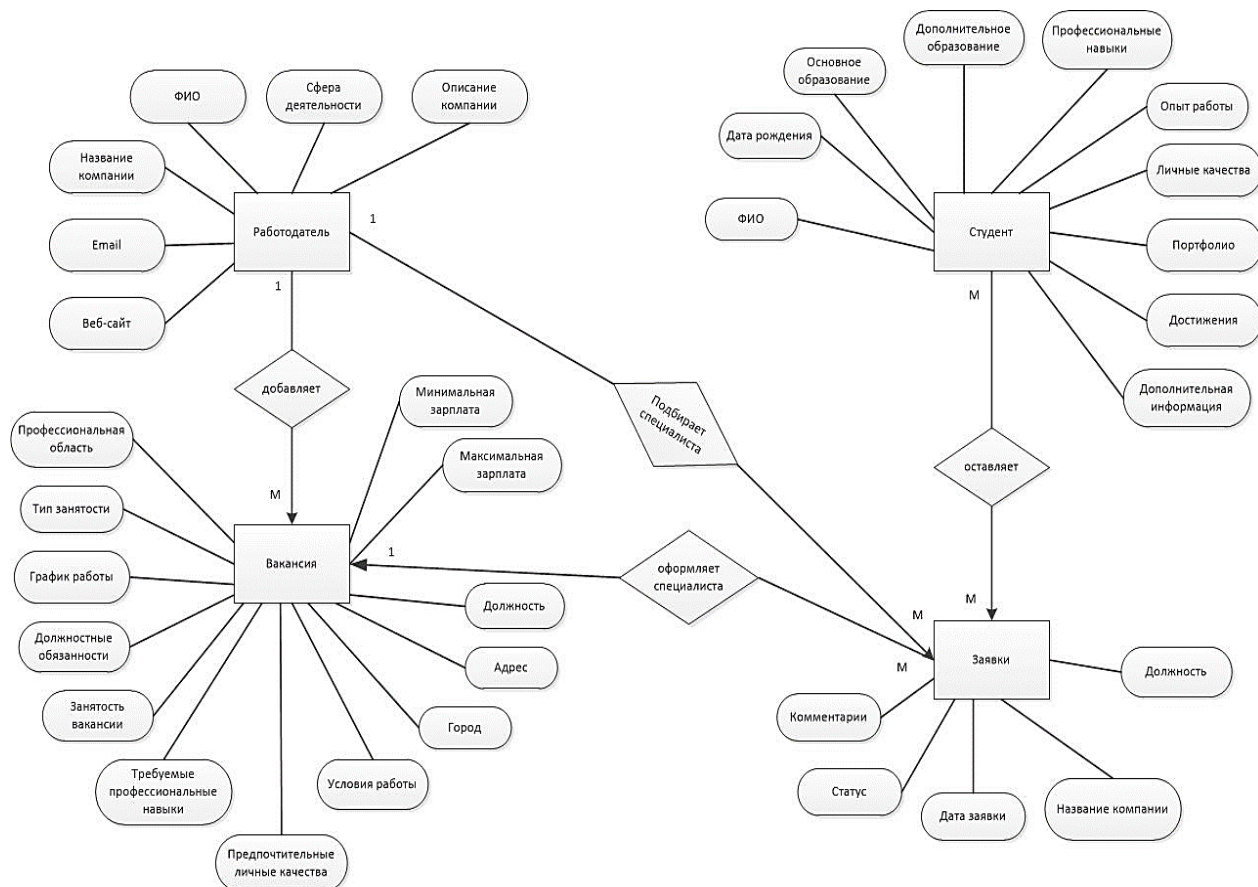


Рис. 6. ER-диаграмма предметной

Fig. 6. ER diagram of the subject

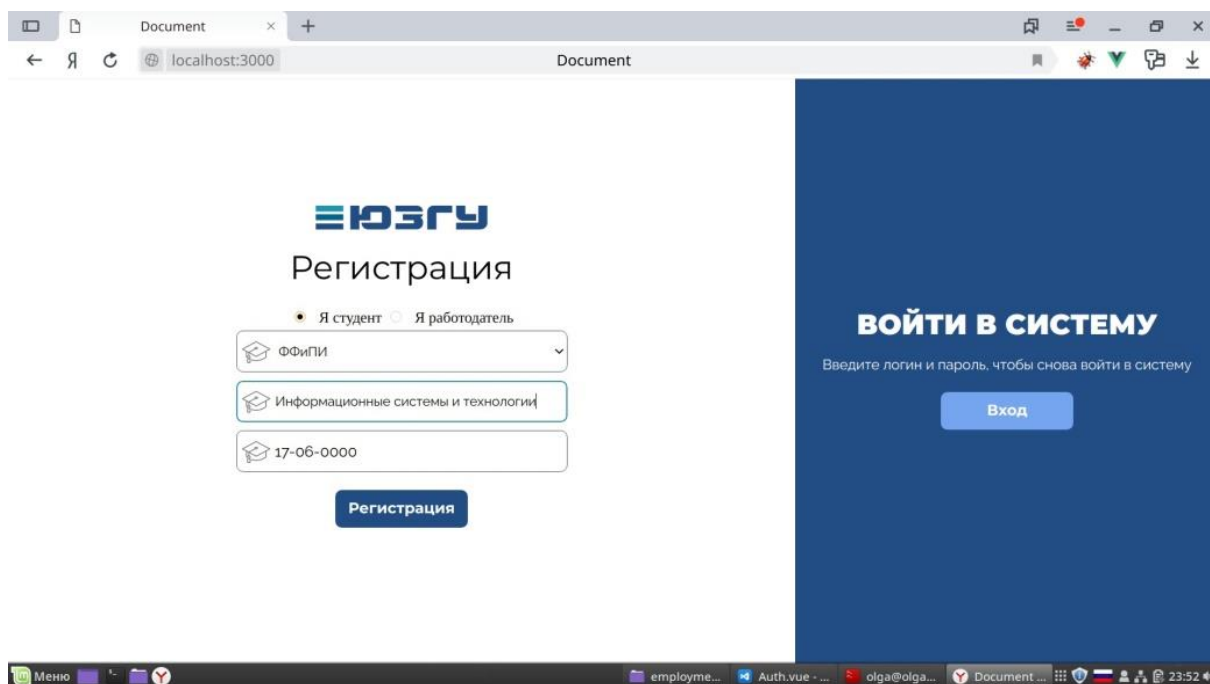


Рис. 7. Вход в систему и процедура регистрации нового пользователя

Fig. 7. Login and new user registration procedure

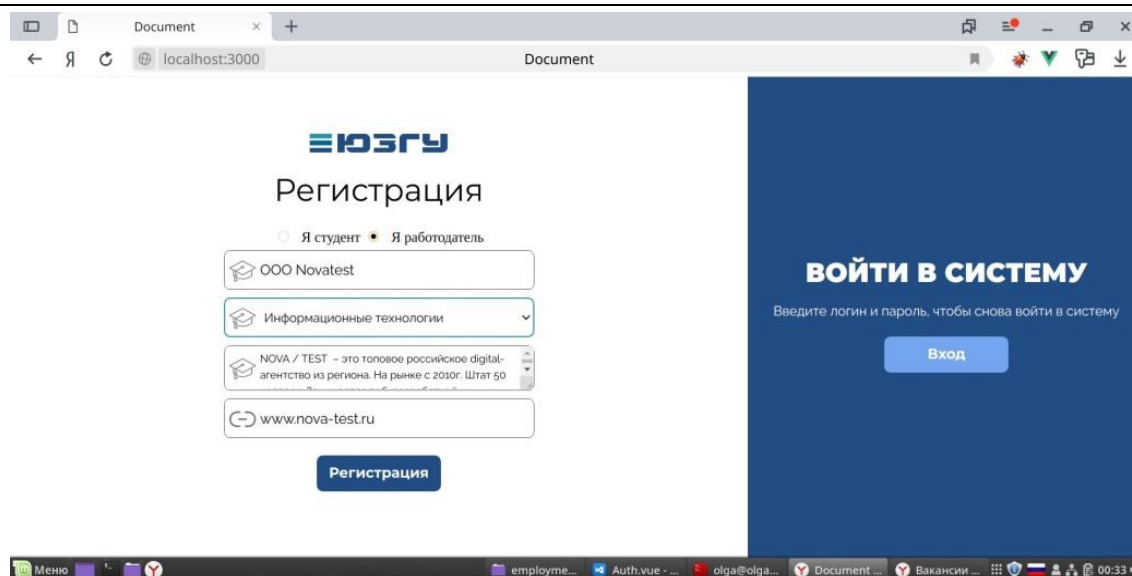


Рис. 8. Интерфейс регистрации работодателя

Fig. 8. Employer registration interface

Для создания аккаунта работодателям не требуется проверка администратором.

В личном кабинете предусмотрена страница «Студенты». На ней размещена таблица для учета всех заявок на регистрацию в системе. Администратор может принять или отклонить заявку,

нажав на соответствующую иконку в строке таблицы [15].

После регистрации всем заявкам по умолчанию присваивается статус «нерассмотрен» (рис. 9).

Личный профиль студента, который успешно зарегистрировался в системе, приведен ниже (рис. 10).

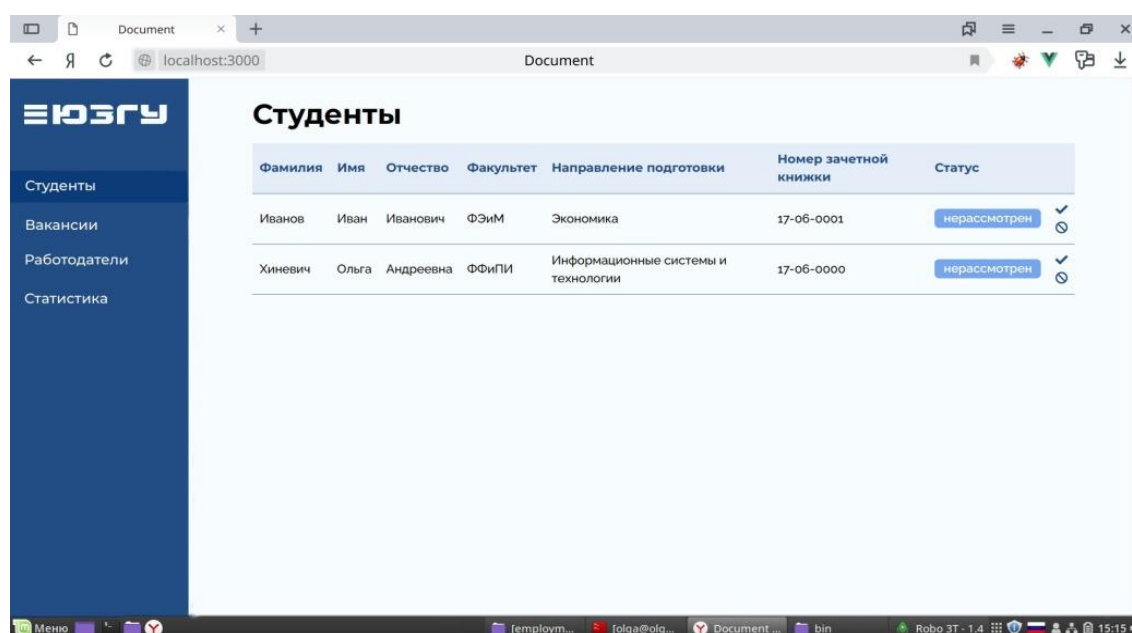


Рис. 9. Интерфейс страницы учета заявок на регистрацию выпускников

Fig. 9. Interface of the page for recording applications for registration of graduates

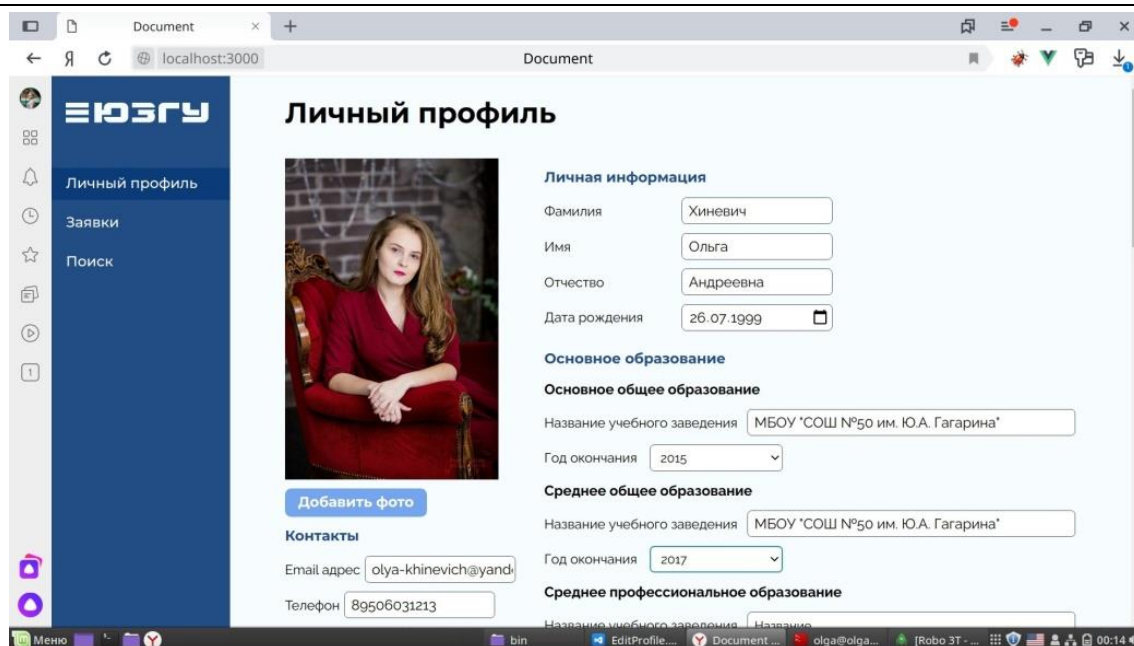


Рис. 10. Интерфейс страницы данных личного профиля

Fig. 10. Personal profile data page interface

Страница редактирования личного профиля позволяет ввести личные и контактные данные, портфолио, достижения, сведения об образовании, опыте работы, профессиональных навыках и личных качествах (рис. 11).

В личном кабинете работодателя аналогично регистрируются данные работодателя. Каждый работодатель имеет возможность на вкладке «Мои вакансии» дать информации о потребности в специалистах.

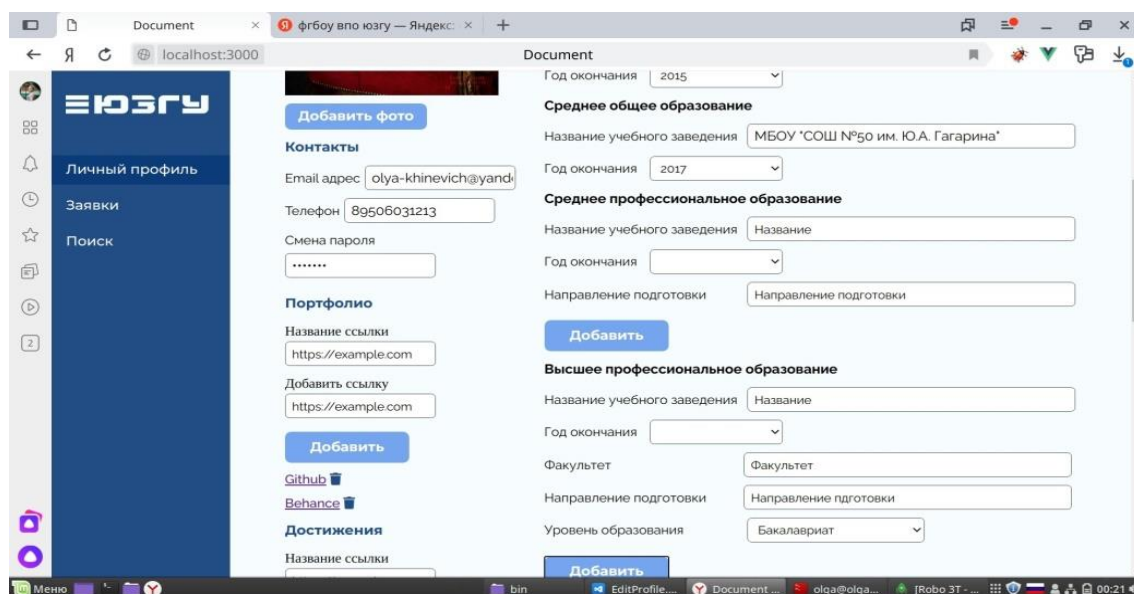


Рис. 11. Интерфейс страницы редактирования личного профиля

Fig. 11. Personal profile editing page interface

При добавлении вакансий даются характеристика предлагаемого места работы, основные сведения о работодателе, требования к соискателю, дополнительная информация и контакты (рис. 12).

Работодатель может самостоятельно добавлять, удалять или обновлять список вакансий, что делает информацию актуальной на текущий момент.

Рассмотрим вид вкладки «Мои вакансии» в виде таблицы с размещенными работодателем вакансиями (рис. 13).

Рис. 12. Интерфейс страницы добавления вакансии

Fig. 12. Job Addition Page Interface

Должность	Минимальная зарплата	Обязанности	Условия работы	Профессиональные навыки	Статус
Frontend Developer	30000	- работа в большой команде с сайтами крупных российских и международных заказчиков; - соблюдение проектных бизнес-процессов; - верстка проектов с нуля; - доработка готовых проектов (исправление багов, расширение функционала); - разработка компонентов на JS-фреймворках; - верстка почтовых рассылок.	- Зарботная плата по результатам собеседования успешного кандидата (ориентируемся на ваши пожелания, опыт и навыки); - Оформление по ТК РФ; - График работы: пн-пт с 10:00 до 19:00, час перерыв - 19:00; - Офис в центре города и комфортные условия рабочего места.	- HTML5, CSS3, JS на среднем уровне - SCSS/SASS - Gulp, Webpack - Git	открыта

Рис. 13. Интерфейс страницы учета добавленных вакансий работодателя

Fig. 13. Interface of the page for recording added vacancies of the employer

В своем личном кабинете соискатель вакансии может выполнять направленный поиск с учетом заданных критериев (рис. 14).

Пример результатов поиска представлен ниже (рис. 15).

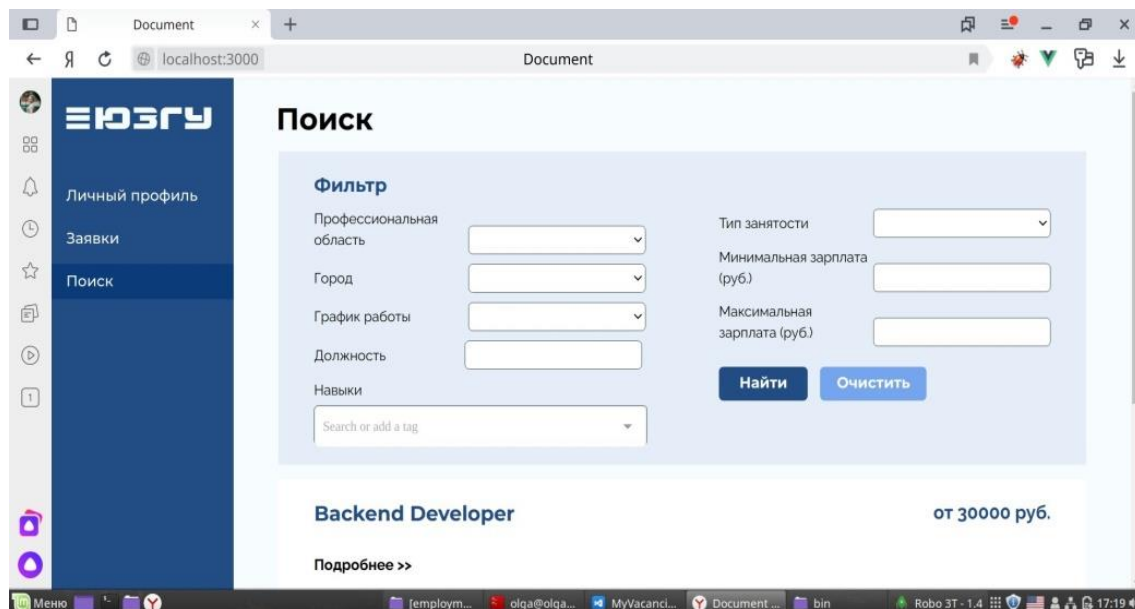


Рис. 14. Интерфейс страницы поиска вакансий

Fig. 14. Job search page interface

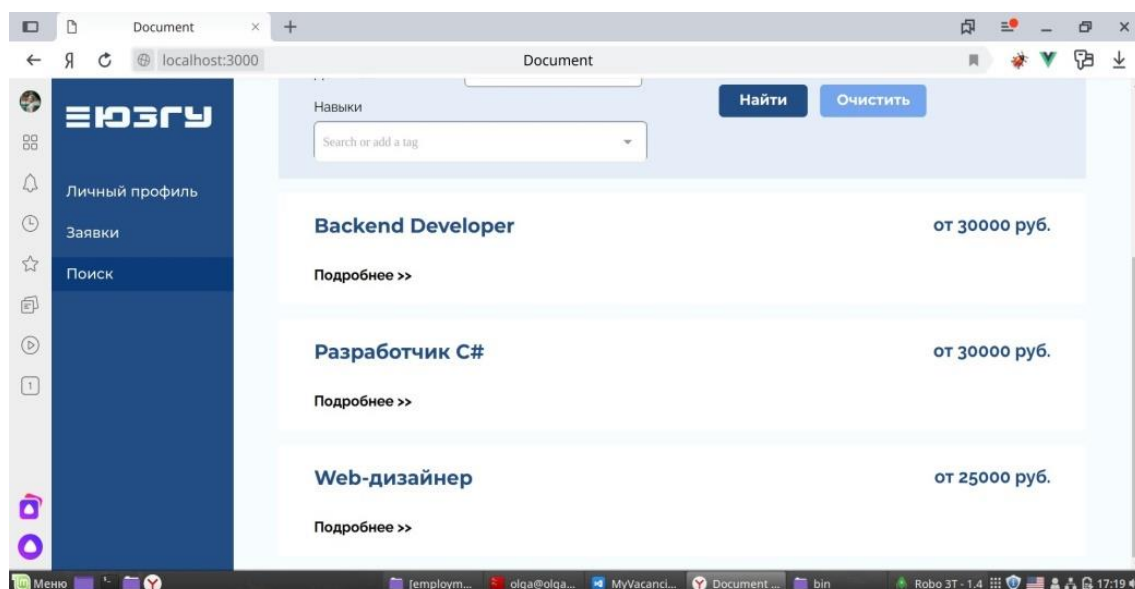


Рис. 15. Интерфейс страницы поиска вакансий

Fig. 15. Job search page interface

Режим «Подробнее» отображает полную информацию о вакансии (рис. 16).

Если вакансия заинтересовала соискателя, ему предлагается написать письмо-заявку (рис. 17).

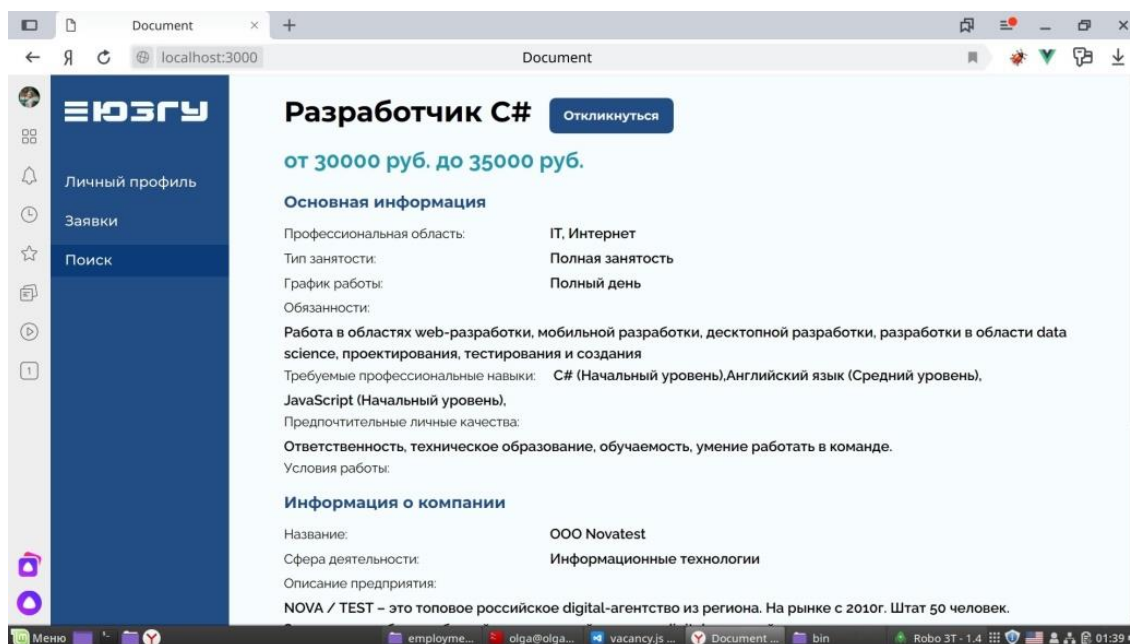


Рис. 16. Развернутые сведения о вакансии

Fig. 16. Detailed information about a vacancy

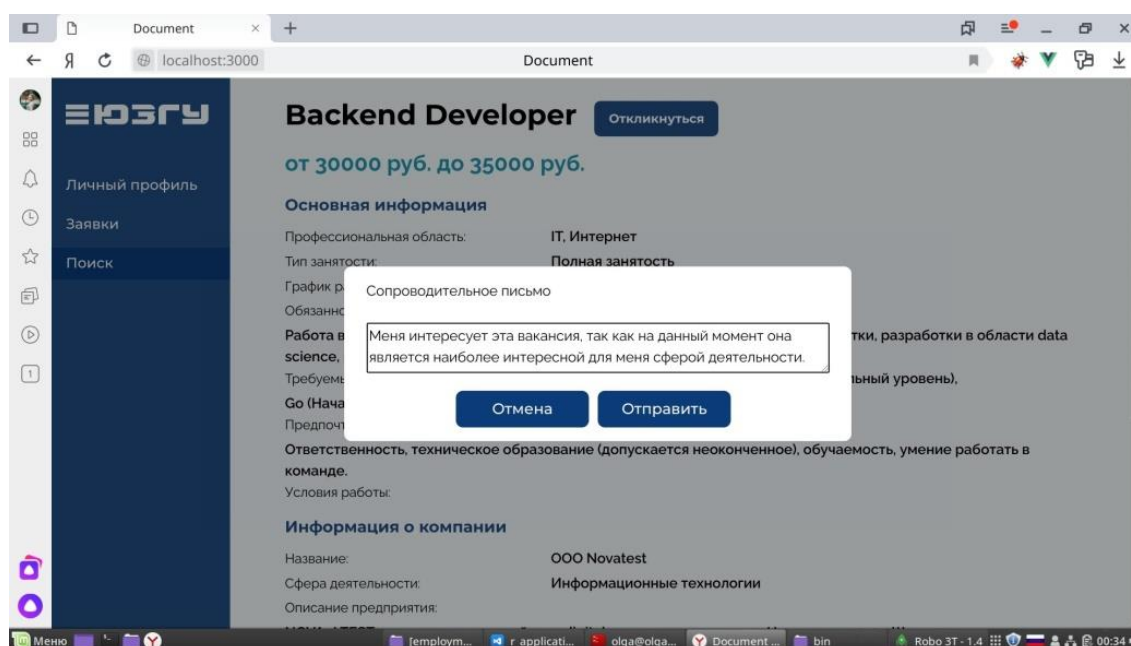


Рис. 17. Модальное окно письма-заявки

Fig. 17. Modal window of the application letter

Заявка добавляется в БД со статусом «в процессе» и отображается в личном кабинете работодателя и студента на страницах с учетом заявок (рис. 18).

Соискатель вакансии получает уведомление на e-mail о том, что заявка рассмотрена (рис. 19).

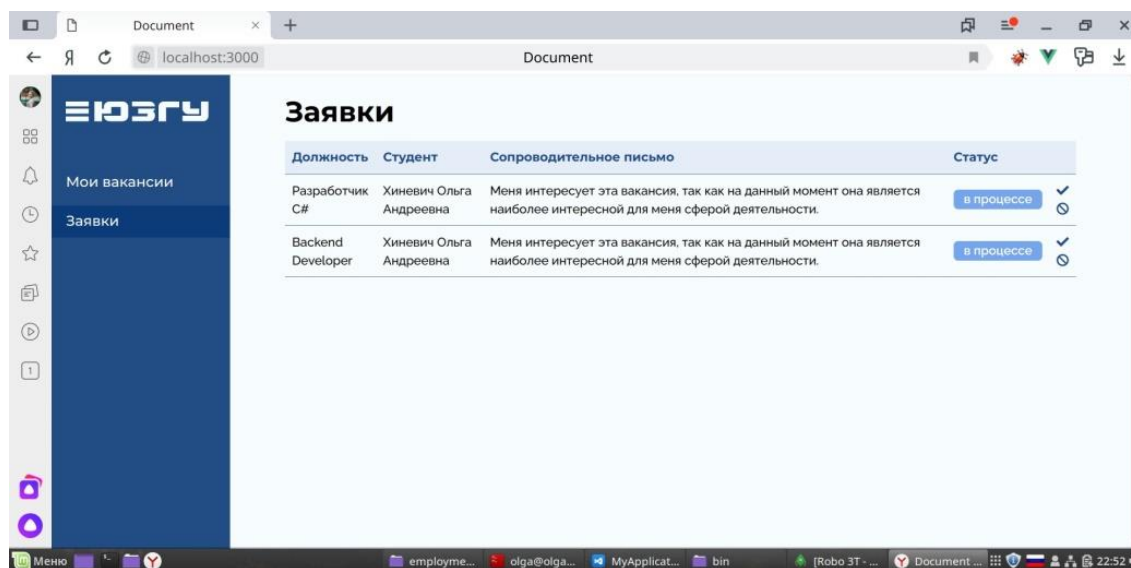
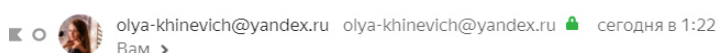


Рис. 18. Интерфейс страницы учета заявок у работодателя

Fig. 18. Interface of the application accounting page at the employer



Уведомление из приложения по трудоустройству выпускников



Ваша заявка рассмотрена работодателем.

Рис. 19. Уведомление о рассмотрении заявки работодателем

Fig. 19. Notification of application review by the employer

Результаты и их обсуждение

В современных условиях большое внимание в вузе сосредоточено на использовании методов и инструментов построения работы в области трудоустройства и карьерного продвижения выпускников.

Использование специализированной многофункциональной онлайн-платформы обеспечивает формирование электронного портфолио обучающегося, предоставление сведений о текущих потребностях в специалистах в регионе, дает возможность, с одной стороны,

выпускнику получить информацию о работодателях, их пожеланиях и требованиях к соискателю вакансии, с другой – представителям предприятий-работодателей заранее провести анализ и рассмотреть возможных кандидатов из числа выпускников, так как потенциальные работодатели могут видеть открытую часть портфолио обучающихся.

Рассмотрим прямое взаимодействие работодателя (рис. 20), где в личном кабинете соискателя изменяется статус заявки и добавляется комментарий от работодателя с положительным или отрицательным ответом.

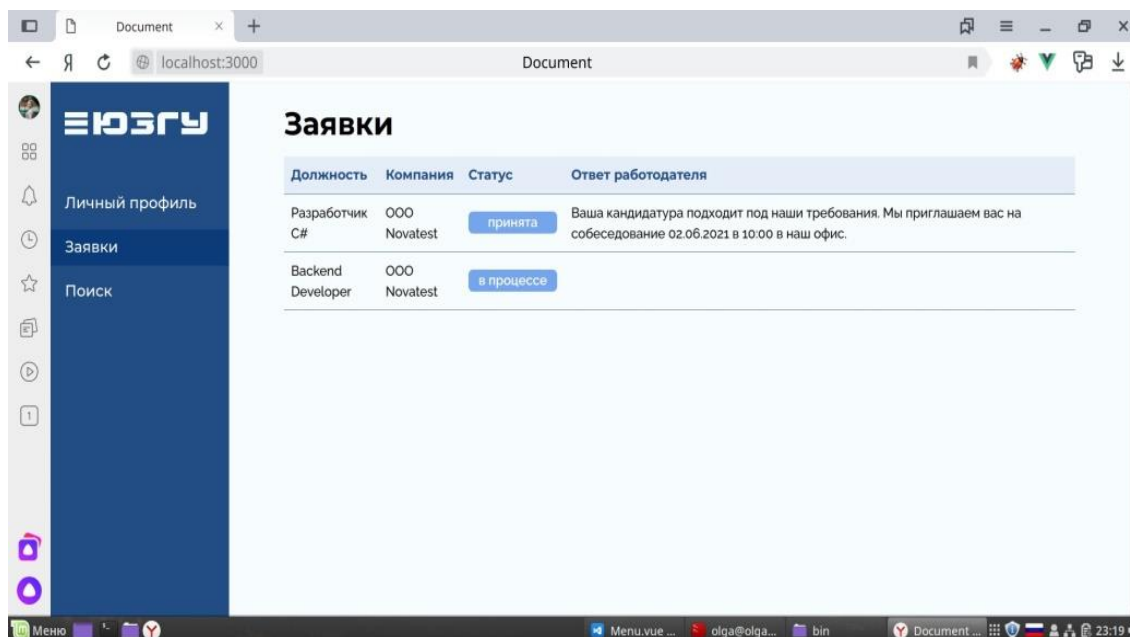


Рис. 20. Получение ответа от работодателя и изменение статуса заявки

Fig. 20. Receiving a response from the employer and changing the application status

Статистику результатов взаимодействия выпускников и работодателей можно видеть в личном кабинете администратора.

На странице статистики находятся диаграммы, отображающие соотношение студентов, работодателей и вакансий в системе (рис. 21).

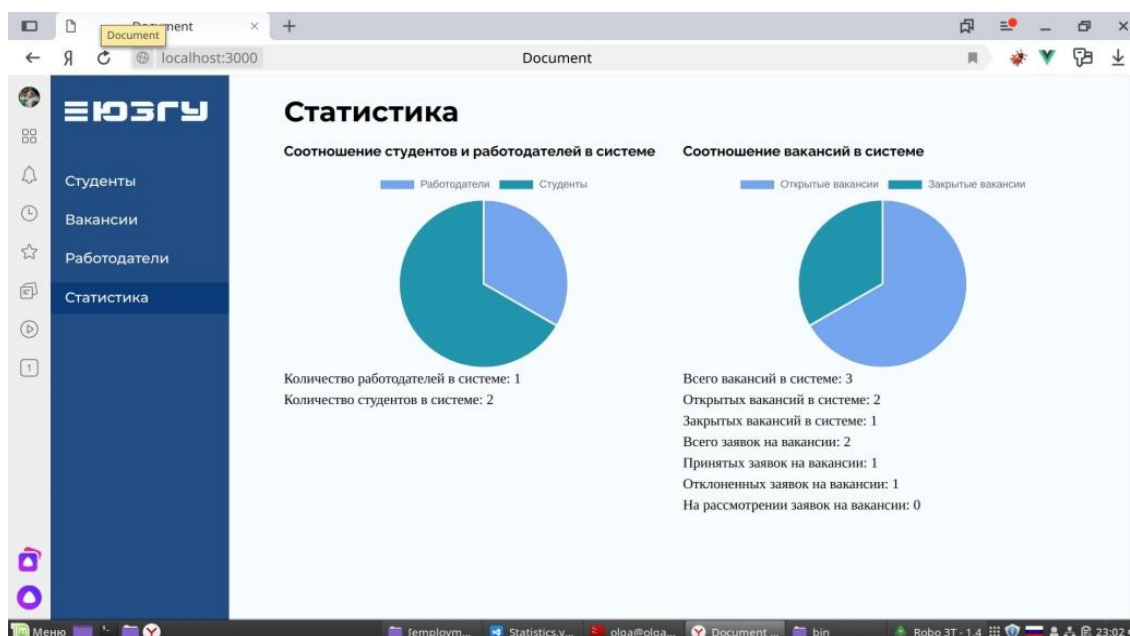


Рис. 21. Интерфейс страницы «Статистика» в кабинете администратора

Fig. 21. Interface of the "Statistics" page in the administrator's office

Выводы

Разработанная многофункциональная онлайн-платформа имеет отдельные кабинеты: для вуза, для работодателя, для выпускника, что позволит вести учет и статистику трудоустроенных выпускников, вакансий, работодателей и будет способствовать формированию цифровой карьерной среды вуза.

Разработанное программное средство имеет потенциал для дальнейшего развития. Функциональные возможности системы могут легко расширяться благодаря грамотно подобранным технологиям и инструментальным средствам.

Например, может быть добавлена еженедельная рассылка подходящих вакансий на электронную почту выпускни-

кам и зарегистрированным соискателям, может быть добавлен раздел с новостными объявлениями, функция поиска не только вакансий, но и профориентационных конкурсов, мероприятий и рассылка информации о них обучающимся.

В заключение можно отметить, что процесс развития карьерной среды университета является актуальной и перспективной задачей в рамках цифровизации деятельности. Деятельность вуза в области формирования карьерных возможностей будущих молодых специалистов при реализации образовательной программы и анализ востребованности со стороны профильных организаций-работодателей должны рассматриваться как ключевые элементы стратегии развития вуза.

Список литературы

1. Исследовательский центр рекрутингового портала Superjob.ru. URL: <https://www.superjob.ru/research/articles> (дата обращения: 02.03.2025).
2. Центр карьеры ЮЗГУ. URL: <https://ctv.swsu.ru/?ysclid=maxrl3qiah567169757> (дата обращения: 04.03.2025).
3. Ефимова Г. З. Типология карьерных траекторий и мотивации их выбора преподавателями высших учебных заведений // Университетское управление: практика и анализ. 2021. Т. 25, № 3. С. 56–69.
4. Управление доступом к информационным ресурсам в информационных системах / Т. И. Лапина, Э. М. Димов, Д. В. Лапин, Е. А. Петрик // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6, № 4 (23). С. 523–534.
5. Мартин Р. Чистая архитектура. Искусство разработки программного обеспечения. СПб.: Питер, 2018. 352 с.
6. Дакетт Д. HTML и CSS. Разработка и дизайн веб-сайтов. М.: Эксмо, 2017. 480 с.
7. Построение систем мониторинга параметров случайных процессов / Т. И. Лапина, Д. В. Лапин, Е. А. Петрик, Е. А. Криушин // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6, № 4 (23). С. 484–493.

8. Хэррон Д. Разработка серверных веб-приложений в JavaScript. М.: ДМК Пресс, 2012. 144 с.
9. Introduction // Vue.js. URL: <https://ru.vuejs.org/v2/guide> (дата обращения: 12.03.2025).
10. Деятельность центров карьеры в практике российских вузов / М. Д. Миронова, Е. В. Гончарова, Г. Т. Гузельбаева, А. И. Подгорная // Педагогический журнал. 2023. Т. 13, № 7А. С. 187–201.
11. Бэнкер К. MongoDB в действии. М.: ДМК Пресс, 2012. 394 с.
12. 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.
13. Янг А., Мек Б., Кантелон М. Node.js в действии. СПб.: Питер, 2018. 432 с.
14. Никулина Ю. Н. Карьерное развитие молодежи в экосистеме кадрового партнерства вуза // Лидерство и менеджмент. 2023. Т. 10, № 2. С. 561–578.
15. Применение CUDA ядер в задачах обработки информации в базе данных при помощи BLAZINGSQL / Т. И. Лапина, Ю. А. Криушина, Е. А. Криушин, С. А. Филист // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 3. С. 97–109.

References

1. Recruitment Portal Research Center Superjob.ru. (In Russ.) Available at: <https://www.superjob.ru/research/articles> (accessed 02.03.2025).
2. South Ural State University Career Center. (In Russ.) Available at: <https://ctv.swsu.ru/?ysclid=maxrl3qiah567169757> (accessed 04.03.2025).
3. Efimova G.Z. Typology of career trajectories and motivation of their choice by applicants of higher educational institutions. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz = University Management: Practice and Analysis*. 2021;25(3):56–69. (In Russ.)
4. Lapina T.I., Dimov E.M., Lapin D.V., Petrik E.A. Management of access to information resources in information systems. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technologies*. 2018;6:(4):523–534. (In Russ.)
5. Martin R. Pure Architecture. The art of software development. Saint Petersburg: Piter; 2018. 352 p. (In Russ.)
6. Duckett D. HTML and CSS. Development and design of websites. Moscow: Eksmo; 2017. 480 p. (In Russ.)

7. Lapina T.I., Lapin D.V., Petrik E.A., Kriushin E.A. Building systems for monitoring the parameters of random processes. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* = *Modeling, Optimization and Information Technologies*. 2018;6(4):484–493. (In Russ.)
8. Harron D. Development of server-side web applications in JavaScript. Moscow: DMK Press; 2012. 144 p. (In Russ.)
9. Introduction. Vue.js. Available at: <https://ru.vuejs.org/v2/guide> (accessed 12.03.2025).
10. Mironova M.D., Goncharova E.V., Guzelbaeva G.T., Podgornaya A.I. Activities of career centers in the practice of Russian universities. *Pedagogicheskii zhurnal* = *Pedagogical Journal*. 2023;13(7A):187–201. (In Russ.)
11. Banker K. MongoDB in action. Moscow: DMK Press; 2012. 394 p. (In Russ.)
12. Degterev S.V., Lapina T.I., Kriushina Yu.A., Kriushin E.A. Application of CUDA and tensor kernels in object detection and recognition tasks. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2022;12(1):99–110. (In Russ.)
13. Yang A., Mek B., Cantelon M. Node.js in action. Saint Petersburg: Piter; 2018. 432 p. (In Russ.)
14. Nikulina Yu. N. Career development of youth in the ecosystem of university personnel partnership. *Liderstvo i menedzhment* = *Leadership and Management*. 2023;10(2):561–578. (In Russ.)
15. Lapina T.I., Kriushina Yu.A., Kriushin E.A., Filist S.A. Application of CUDA cores in information processing tasks in a database using BLAZINGSQL. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2022;12(3):97–109. (In Russ.)

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, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Science, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: lapinati@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7959-3053

Хиневи́ч Ольга Сергеевна, магистрант,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: olga-khinevich@yandex.ru,
ORCID: 0000-0001-7959-3053

Olga S. Khinevich, Undergraduate, Southwest
State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: olga-khinevich@yandex.ru,
ORCID: 0000-0001-7959-3053

Петрик Елена Анатольевна, кандидат
технических наук, доцент, доцент кафедры
программной инженерии, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: petrik.ea@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-9296-404

Elena A. Petrik, Candidate of Sciences
(Engineering), Associate Professor, Associate
Professor of the Department of Software
Engineering, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: petrik.ea@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-9296-404

Коломи́ец Елена Александровна, кандидат
технических наук, доцент кафедры
вычислительной техники, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: lenus07@yandex.ru,
ORCID: 0009-0002-6004-4155,
Author ID: 862472

Elena A. Kolomiets, Candidate
of Sciences (Engineering), Associate Professor
of the Department of Computer Engineering,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: lenus07@yandex.ru,
ORCID: 0009-0002-6004-4155,
Author ID: 862472

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-46-57>



УДК 616.21

Применение компьютерной программы в диагностике хронических риносинуситов

Д. В. Трусов^{1,3} ✉, Т. И. Субботина², Н. К. Починина³

¹Тамбовская областная клиническая больница имени В. Д. Бабенко
ул. Московская, д. 29, г. Тамбов 392000, Российская Федерация

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

³Пензенский институт усовершенствования врачей – филиал Российской медицинской академии
непрерывного профессионального образования Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. Стасова, д. 8А, г. Пенза 440060, Российская Федерация

✉ e-mail: trudoc747@rambler.ru

Резюме

Цель исследования – разработка компьютерной программы для улучшения диагностики и мониторинга лечения больных хроническим риносинуситом.

Методы. Программа разработана на основе проведенного многофакторного и корреляционного анализ с учетом комбинации показателей инвазивных методов лабораторной диагностики. Лабораторную диагностику проводят для биомаркеров эндотелиальной дисфункции в образцах периферической крови пациентов (гомоцистеина, цистатина С, высокочувствительного С-реактивного белка (hsCRP), Д-димера). Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611887 от 08.02.2021 г.

Результаты. Основу программы составляют протоколы клинико-лабораторного обследования больных с хроническими риносинуситами. Работа программы осуществляется по следующим этапам: введение данных; математический расчет по математической модели; выведение цифрового результата значения «у»; формирование отчета с выведением результата на экран. Программа обладает такими качествами, как наглядность и простота использования. В качестве примеров работы программы приведены клинические случаи. Продемонстрирована работа программы в виде изображения интерфейса.

Заключение. Разработанная программы может быть рекомендована к использованию в клинической практике. В пред- и послеоперационном периодах с помощью этой программы возможно проводить мониторинг лечения с применением объективных стандартизированных высокочувствительных клинико-лабораторных методов исследования.

Внедрение программного комплекса в практику поможет осуществить интегральный подход в диагностике ХРС. Представленная программа является инновационным инструментом при диагностике и оценке эффективности проводимого лечения у больных ХРС. Разработанная программа может быть рекомендована к применению в рутинной практике врача-оториноларинголога в амбулаторных и стационарных условиях учреждений здравоохранения.

Ключевые слова: компьютерная программа; хронический риносинусит; диагностика; мониторинг лечения; система поддержки принятия врачебных решений.

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

Для цитирования: Трусов Д. В., Субботина Т. И., Починина Н. К. Применение компьютерной программы в диагностике хронических риносинуситов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 2. С. 46–57. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-46-57>

Поступила в редакцию 10.04.2025

Подписана в печать 09.05.2025

Опубликована 30.06.2025

The use of a computer program in the diagnosis of chronic rhinosinusitis

Dmitry V. Trusov^{1,3} ✉, Tatyana I. Subbotina², Natalia K. Pochinina³

¹ Tambov Regional Clinical Hospital named after V. D. Babenko
29 Moskovskaya Str., Tambov 392000, Russian Federation

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

³ Penza Institute of Advanced Medical Training is a branch of the Russian Medical Academy of Continuing Professional Education of the Ministry of Health of the Russian Federation
8A Stasov Str., Penza 440060, Russian Federation

✉ e-mail: trudoc747@rambler.ru

Abstract

Purpose of research is to develop a computer program to improve the diagnosis and monitoring of treatment of patients with chronic rhinosinusitis.

Methods. The program was developed on the basis of multifactorial and correlation analyses, taking into account a combination of indicators of invasive laboratory diagnostic methods. Laboratory diagnostics is performed for biomarkers of endothelial dysfunction in peripheral blood samples of patients (homocysteine, cystatin C, highly sensitive C-reactive protein (hsCRP), D-dimer). The certificate of state registration of the computer program No. 2021611887 dated 02/08/2021 was received.

Results. The program is based on protocols of clinical and laboratory examination of patients with chronic rhinosinusitis. The program operates according to the following stages: data input; mathematical calculation using a mathematical model; output of a digital result of the value "y"; generation of a report with the output of the result on the screen. The program has such qualities as visibility and ease of use. Clinical cases are given as examples of the program's work. The operation of the program is demonstrated in the form of an interface image.

Conclusion. The developed software can be recommended for use in clinical practice. In the pre- and postoperative periods, with the help of this program, it is possible to conduct treatment monitoring using objective standardized highly sensitive clinical and laboratory research methods. The implementation of the software package in practice will help to implement an integrated approach in the diagnosis of CRS. The presented program is an innovative tool for the diagnosis and evaluation of the effectiveness of treatment in patients with CRS. The developed program can be recommended for use in the routine practice of an otorhinolaryngologist in outpatient and hospital settings of healthcare institutions.

Keywords: computer program; chronic rhinosinusitis; diagnostics; treatment monitoring; medical decision support system.

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

For citation: Trusov D.V. Subbotina T.I., Pochinina N.K. The use of a computer program in the diagnosis of chronic rhinosinusitis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika,*

Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2025;15(2):46–57

Введение

Хронический риносинусит (ХРС) – одно из самых частых заболеваний, с которым имеет дело в своей практической работе каждый врач-оториноларинголог, распространенность его среди населения составляет 0,2–4% [1]. С возрастом заболеваемость ХРС имеет тенденцию к нарастанию на 2,7–6,6% [2].

Несмотря на достижения в медицине, проблема заболеваемости и рецидивирования ХРС остается актуальной по-прежнему на сегодняшний день [3]. Это заставляет врачей-оториноларингологов искать пути решения этой проблемы [4; 5]. На сегодняшний день эндотелиальная дисфункция (ЭД) является одним из актуальных вопросов в теории возникновения заболеваний как патогенетическое звено. Диагностика эндотелиальной дисфункции имеет как научное, так и практическое значение для врачей. Своевременная медикаментозная коррекция, направленная на устранение эндотелиальной дисфункции, может изменить прогноз заболевания [6]. Возможно, что с точки зрения междисциплинарного подхода к решению этой задачи будут найдены необходимые инструменты, которые помогут прогнозировать течение заболевания.

Разработка стандартизированных, объективных методов диагностики является актуальным направлением как в оториноларингологии, так и в медицине в целом [7]. В медицине на сегодняшний

день, как и в других сферах, внедряются информационные системы [8]. Информационные технологии в медицине связаны с машинным обучением, которые, в свою очередь, базируются на статистических данных и системном походе к обработке информации [9]. Врачи активно пользуются в своей работе медицинскими информационными системами (МИС), в которых содержатся данные по анамнезу больного, проведенных методов диагностики и лечения [8]. Программные диагностические комплексы для ЭВМ могут быть интегрированы в МИС (гибридные МИС) для функционирования систем поддержки принятия врачебных решений (СППВР) [10].

Программные комплексы для ЭВМ активно применяются в хирургии для планирования и прогнозирования результата операции, в организации здравоохранения [11]. Внедрение в здравоохранение машинного обучения и искусственного интеллекта требует понимания и внимания со стороны специалистов [12].

Качество оказания медицинской помощи в настоящее время зависит от ряда факторов [13]. Одним из них является время, в которое принимается решение. От этого зависит доступность и эффективность оказания медицинской помощи [14]. Для этого необходимо врачу-специалисту проанализировать множество данных о пациенте: жалобы,

анамнез, результаты обследования. Здесь на помощь врачу и приходят современные цифровые технологии, такие как СППВР. При разработке СППВР необходимо учитывать специфику узких специальностей [15].

Повышение эффективности диагностики и мониторинга лечения больных требовало поиск новых путей решения этих задач. Поэтому в 60-х годах XX века в медицинской практике стали использоваться математические методы [10]. С помощью математических методов и информационных технологий возможно более быстрое и эффективное решение проблемы ранней диагностики заболеваний, так как новые технологии помогают учитывать те нюансы, которые даже опытному врачу трудно заметить [16; 17].

СППВР применяются в тех областях медицины, в которых необходимо проводить дифференциальную диагностику, прогнозирование течения заболевания, подбор методов исследования, разработку индивидуального плана лечения, определения группы риска, мониторинга лечения, прогнозирование заболевания, персональные рекомендации по здоровьесбережению [18]. СППВР внедрены в работу в лечебных учреждениях (поликлиники, стационары), а также в качестве обучающих модулей. Разработка СППВР происходит в несколько этапов. Первый – это определение цели программы, затем – условия оказания помощи. Далее выполняется разработка программной реализации (веб-приложение, мобильное приложение) с последующей государственной

регистрацией программного обеспечения [19].

Целью исследования является разработка компьютерной программы для улучшения диагностики хронических риносинуситов.

Материалы и методы

Программа предназначена для оптимизации подходов в диагностике и прогнозировании течения заболевания у больных с хроническими патологиями околоносовых пазух. Программа выполнена на основе многофакторного анализа с учетом комбинации показателей инвазивных методов лабораторной диагностики [20]. Лабораторную диагностику проводят для биомаркеров эндотелиальной дисфункции в образцах периферической крови пациентов (гомоцистеина, цистатина С, высокочувствительного С-реактивного белка (hsCRB), Д-димера). Программа предназначена для работы в амбулаторном и стационарном звеньях без дополнительных затрат рабочего времени с последующим выводом результатов расчета с помощью математической модели на экран компьютера.

Получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611887 от 08.02.2021 г.

Тип реализующей ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК.

Язык: Perl (выполняемый в среде Strawberry Perl с фреймворком Mojolicious).

ОС: MS Windows 98/2000/XP/Vista/7, Linux, FreeBSD, Mac OS X.

Объем программы для ЭВМ: 69,3 Кб.

Результаты и их обсуждение

Работа программы реализуется следующим образом.

Врач собирает информацию о пациенте (результаты обследования), заносит все данные в программу для ЭВМ и в результате математической обработки материала получает результат с выводением на экран компьютера.

Этапы работы программы:

- введение данных;
- математический расчет по математической модели;
- выводение цифрового результата значения «у»;
- формирование отчета с выводением результата на экран.

Результат программы выдается в одном из двух вариантов: здоров или болен.

Программа обладает следующими качествами:

- наглядность и простота использования;
- выводение цифрового результата «у» на экран;
- возможность применения программы для мониторинга лечения больного;
- применение в повседневной практике врача.

Приведенный клинический пример показывает диагностическую значимость разработанной программы для ЭВМ (рис. 1).

[Все пациенты](#)

[Добавить пациента](#)

Добавить нового пациента

Фамилия пациента	
Имя пациента	
Отчество пациента	
Пол	мужской
Дата рождения (Д.М.Г)	
Домашний адрес	
Лечащий врач (ФИО)	
Гомоцистеин	
ЦистатинС	
Д-Димер	
hsCRB	
Отправить	

Рис. 1. Оболочка (интерфейс) программы

Fig. 1. The interface of the program

Пример № 1. Мужчина, 27 лет (рис. 2).

Концентрация показателей в крови:
гомоцистеин – 6,9 мкмоль/л, цистатин
С – 854,6 нг/мл, Д-димер – 98,5 нг/мл,
вчСРБ – 0,5 мг/л.

Результат расчета программы: здоров.

Пример № 2. Мужчина, 36 лет. Диа-
гноз: Хронический риносинусит (рис. 3).

При поступлении в стационар до ле-
чения концентрации показателей в
крови: гомоцистеин – 14,6 мкмоль/л, ци-
статин С – 1067,4 нг/мл, Д-димер –
260,5 нг/мл, вчСРБ – 7,3 мг/л.

Результат расчета программы: болен.

[Все пациенты](#)

[Добавить пациента](#)

Добавить нового пациента

Фамилия пациента	у
Имя пациента	у
Отчество пациента	у
Пол	мужской ▼
Дата рождения (Д.М.Г)	уууууу
Домашний адрес	у
Лечащий врач (ФИО)	у
Гомоцистеин	6,9
ЦистатинС	854,6
Д-Димер	98,5
hsCRB	0,3
Отправить	

Рис. 2. Пример расчёта. Этап введения данных

Fig. 2. An example of the calculation. The data entry stage

[Все пациенты](#)[Добавить пациента](#)

Добавить нового пациента

Фамилия пациента	x
Имя пациента	x
Отчество пациента	x
Пол	мужской
Дата рождения (Д.М.Г)	xxxxxx
Домашний адрес	x
Лечащий врач (ФИО)	x
Гомоцистеин	14,6
ЦистатинС	1067,4
Д-Димер	260,5
hsCRB	7,3

Рис. 3. Пример расчёта. Этап введения данных

Fig. 3. An example of the calculation. The data entry stage

Подобным образом рассчитывается показатель мониторинга лечения.

Таким образом, внедрение программного комплекса в практику поможет осуществить интегральный подход в диагностике ХРС.

Выводы

Представленная программа является инновационным инструментом при диагностике и оценке эффективности проводимого лечения у больных ХРС.

Разработанная программа может быть рекомендована к применению в рутинной практике врача-оториноларинголога, так как позволяет проводить мониторинг лечения, прогнозировать результат и выбор тактики ведения больного. Программа является современным, удобным приложением в обследовании пациента. В пред- и послеоперационном периодах позволяет проводить мониторинг лечения с применением объективных стандартизированных высокочувстви-

тельных клинико-лабораторных методов исследования.

С учетом простоты данной программы, ее высокой информативности и диагностической значимости она может быть рекомендована к использованию в

клинической практике. При этом необходимо помнить, что главным в лечении пациента остается врач. Программа может применяться как в амбулаторном звене, так и в стационаре.

Список литературы

1. Оценка распространенности хронического риносинусита / А. А. Кривопапов, Н. В. Мороз, С. А. Артюшкин, П. А. Шамкина, Г. П. Захарова // Российская оториноларингология. 2022. № 21(5). С. 91–98. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2022-5-91-98>
2. Хронический риносинусит. Практические рекомендации / А. В. Гуров, С. А. Карпищенко, Е. П. Карпова [и др.] // Фармакология и фармакотерапия. Спецвыпуск. 2024. С. 54–68. https://doi.org/10.46393/27132129_2024_1_56
3. Лазарева А. М., Смирнова О. В. Иммунологические особенности различных фенотипов хронического риносинусита // Медицинская иммунология. 2025. Т. 27, № 2. С. 275–286. <https://doi.org/10.15789/1563-0625-IFO-3026>
4. Кочетков П. А., Свистушкин В. М., Щенникова Е. С. Применение интраназальных глюкокортикостероидов в комплексном лечении пациентов с хроническими заболеваниями носа и околоносовых пазух // Медицинский совет. 2020. № 6. С. 66–70. <https://doi.org/10.21518/2079-701X-2020-6-66-70>
5. European position paper on rhinosinusitis and nasal polyps / W. J. Fokkens, V. J. Lund, C. Hopkins [et al.] // Rhinology. 2020. N 58(29). P. 1–464.
6. Васина Л. В., Петрищев Н. Н., Власов Т. Д. Эндотелиальная дисфункция и ее основные маркеры // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2017. № 1(61). С. 4–15.
7. Абдуганиева Ш. Х., Никонорова М. Л. Цифровые решения в медицине // Крымский журнал экспериментальной и клинической медицины. 2022. Т. 12, № 2. С. 73–85. <https://doi.org/10.29039/2224-6444-2022-12-2-73-85>
8. Гусев А. В, Зарубина Т. В. Поддержка принятия врачебных решений в медицинских информационных системах медицинской организации // Врач и информационные технологии. 2017. № 2. С. 60–72.
9. Лучинин А. С. Искусственный интеллект в гематологии // Клиническая онкогематология. 2022. № 15(1). С. 16–27. <https://doi.org/10.21320/2500-2139-2022-15-1-16-27>
10. Кобринский Б. А. Системы поддержки принятия врачебных решений в повышении квалификации: история и современные тенденции // Методология и технология непрерывного профессионального образования. 2020. № 4(4). С. 21–37. <https://doi.org/10.24075/MTCPE.2020.022>

11. Файзуллин Т. Р., Алексанян Т. А. Клинический опыт применения программы ЭВМ для прогнозирования рисков осложнений при эстетических операциях на молочной железе // Пластическая хирургия и эстетическая медицина. 2023. № 4. С. 23–26. <https://doi.org/10.17116/plast.hirurgia202304123>
12. Кузьминов О. М., Фетисова В. И., Фетисов И. А. Информационная модель анализа качества медицинской помощи конкретному больному для дидактического обеспечения образовательных программ // Научный результат. Медицина и фармация. 2017. Т. 3, № 1. С. 31–41. <https://doi.org/10.18413/2313-8955-2017-3-1-31-41>
13. Benjamens S., Dhunoo P., Mesko B. The state of artificial intelligence-based FDA-approved medical devices and algorithms: an online database // N. P. J. Digit. Med. 2020. N 3(1). P. 118. <https://doi.org/10.1038/s41746-020-00324-0>
14. Увалиева И. Архитектурно-алгоритмическая модель интеллектуальной системы поддержки принятия клинических решений // Уральский симпозиум по биомедицинской инженерии, радиоэлектронике и информационным технологиям (USBREIT). 2020. С. 180–183. <https://doi.org/10.1109/USBREIT48449.2020.9117801>
15. Демушкина К. М., Демушкин М. О., Кузьмин А. В. Обзор методов проектирования систем поддержки принятия врачебных решений // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 2. С. 75–89. <https://doi.org/10.21685/2227-8486-2022-2-6>
16. Создание информационной системы поддержки принятия врачебных решений на основе методов доказательной медицины / Г. С. Лебедев, Э. Н. Фартушный, И. А. Шадеркин [и др.] // Журнал телемедицины и электронного здравоохранения. 2019. Т. 5, № 1. С. 8–16. <https://doi.org/10.29188/2542-2413-2019-5-1-8-16>
17. Реброва О. Ю. Эффективность систем поддержки принятия врачебных решений: способы и результаты оценки // Клиническая и экспериментальная тиреоидология. 2019. Т. 15, № 4. С. 148–155. <https://doi.org/10.14341/ket12377>
18. Искусственный интеллект в медицине. Общие положения. Философские аспекты / Н. Н. Потекаев, О. В. Доля, Н. В. Фриго [и др.] // Клиническая дерматология и венерология. 2022. № 21(6). С. 749–756. <https://doi.org/10.17116/klinderma202221061749>
19. Князев Е. Г., Самченко А. А., Рюмкин К. В. Формирование системы поддержки принятия врачебных решений на основе оцифровки клинических рекомендаций с применением инструментов формальной логики // Менеджмент качества в медицине. 2019. № 4. С. 52–57.
20. Мамаев А. Н., Кудлай Д. А. Статистические методы в медицине. М.: Практическая медицина, 2021. 136 с.

References

1. Krivopalov A.A., Moroz N.V., Artyushkin S.A., Shamkina P.A., Zakharova G.P. Assessment of the prevalence of chronic rhinosinusitis. *Rossiiskaya otorinolaringologiya = Russian Otorhinolaryngology*. 2022;(21):91–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2022-5-91-98>
2. Gurov A.V., Karpishchenko S.A., Karpova E.P., et al. Chronic rhinosinusitis. practical recommendations. *Farmakologiya i farmakoterapiya. Spetsvypusk = Pharmacology and Pharmacotherapy. Special Issue*. 2024. P. 54–68. (In Russ.) https://doi.org/10.46393/27132129_2024_1_56
3. Lazareva A.M., Smirnova O.V. Immunological features of various phenotypes of chronic rhinosinusitis. *Meditinskaya immunologiya = Medical Immunology*. 2025;27(2):275–286. (In Russ.) <https://doi.org/10.15789/1563-0625-IFO-3026>
4. Kochetkov P.A., Svistushkin V.M., Schennikova E.S. The use of intranasal glucocorticosteroids in the complex treatment of patients with chronic diseases of the nose and paranasal sinuses. *Meditinskii sovet = Medical Council*. 2020;(6):66–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.21518/2079-701X-2020-6-66-70>
5. Fokkens W.J., Lund V.J., Hopkins C., et al. European position paper on rhinosinusitis and nasal polyps. *Rhinology*. 2020;(58):1–464.
6. Vasina L.V., Petrishchev N.N., Vlasov T.D. Endothelial dysfunction and its causes the main markers. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulyatsiya = Regional Blood Circulation and Microcirculation*. 2017;(1):4–15. (In Russ.)
7. Abduganieva Sh. Kh., Nikonorova M. L. Digital solutions in medicine. *Krymskii zhurnal eksperimental'noi i klinicheskoi meditsiny = Crimean Journal of Experimental and Clinical Medicine*. 2022;12(2):73–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.29039/2224-6444-2022-12-2-73-85>
8. Gusev A.V., Zarubina T.V. Support for medical decision-making in medical information systems of a medical organization. *Vrach i informatsionnye tekhnologii = Doctor and Information Technologies*. 2017;(2):60–72. (In Russ.)
9. Luchinin A.S. Artificial intelligence in hematology. *Klinicheskaya onkogematologiya = Clinical Oncology and Hematology*. 2022;(15):16–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.21320/2500-2139-2022-15-1-16-27>
10. Kobrinsky B.A. Medical decision support systems in advanced training: history and current trends. *Metodologiya i tekhnologiya nepreryvnogo professional'nogo obrazovaniya = Methodology and Technology of Continuing Professional Education*. 2020;(4):21–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.24075/MTCPE.2020.022>
11. Fayzullin T.R., Aleksanyan T.A. Clinical experience in using computer software to predict the risks of complications during aesthetic breast surgery. *Plasticheskaya khirurgiya i esteticheskaya meditsina = Plastic Surgery and Aesthetic Medicine*. 2023;(4):23–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.17116/plast.hirurgia202304123>

12. Kuzminov O.M., Fetisova V.I., Fetisov I.A. An information model for analyzing the quality of medical care for a specific patient for the didactic provision of educational programs. *Nauchnyi rezul'tat. Meditsina i farmatsiya = Scientific Result. Medicine and Pharmacy*. 2017;3(1):31–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.18413/2313-8955-2017-3-1-31-41>
13. Benjamens S., Dhunnoo P., Mesko B. The state of artificial intelligence-based FDA-approved medical devices and algorithms: an online database. *N. P. J. Digit. Med.* 2020;(3):118. <https://doi.org/10.1038/s41746-020-00324-0>
14. Uvalieva I. Architectural and algorithmic model of an intelligent clinical decision support system. In: *Ural'skii simpozium po biomeditsinskoj inzhenerii, radioelektronike i informatsionnym tekhnologiyam (USBREIT) = Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radio Electronics and Information Technologies (USBREIT)*, 2020. P. 180–183. (In Russ.) <https://doi.org/10.1109 / USBREIT48449.2020.9117801>
15. Demushkina K.M., Demushkin M.O., Kuzmin A.V. Review of design methods for medical decision support systems. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society*. 2022;(2):75–89. (In Russ.) <https://doi.org/10.21685/2227-8486-2022-2-6>
16. Lebedev G.S., Fartushny E.N., Shaderkin I.A., et al. Creation of an information system to support medical decision-making based on evidence-based medicine methods. *Zhurnal telemeditsiny i elektronno go zdravookhraneniya = Journal of Telemedicine and Electronic Health*. 2019;5(1):8–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.29188/2542-2413-2019-5-1-8-16>
17. Rebrova O.Y. Effectiveness of medical decision support systems: methods and results of assessment. *Klinicheskaya i eksperimental'naya tireoidologiya = Clinical and Experimental Thyroidology*. 2019;15;(4):148–155. (In Russ.) <https://doi.org/10.14341/ket12377>
18. Potekaev N.N., Dolya O.V., Frigo N.V., et al. Artificial intelligence in medicine. General provisions. Philosophical aspects. *Klinicheskaya dermatologiya i venerologiya = Clinical Dermatology and Venereology*. 2022;(21):749–756. (In Russ.) <https://doi.org/10.17116/klin-derma202221061749>
19. Knyazev E.G., Samchenko A.A., Ryumkin K.V. Formation of a system for supporting medical decision-making based on digitization of clinical recommendations using formal logic tools. *Menedzhment kachestva v meditsine = Quality Management in Medicine*. (In Russ.) 2019;(4):52–57.
20. Mamaev A.N., Kudlay D.A. Statistical methods in medicine. Moscow: Prakticheskaya meditsina; 2021. 136 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Трусов Дмитрий Валерьевич,
врач-оториноларинголог, Тамбовская
областная клиническая больница
имени В. Д. Бабенко, г. Тамбов; Пензенский
институт усовершенствования врачей –
филиал Российской медицинской академии
непрерывного профессионального
образования Министерства здравоохранения
Российской Федерации, г. Пенза,
Российская Федерация,
e-mail: trudoc747@rambler.ru,
ORCID: 0009-0000-9638-4843

Dmitry V. Trusov, Otorhinolaryngologist,
Tambov Regional Clinical Hospital named
after V.D. Babenko, Tambov; Penza Institute
of Advanced Medical Training is a branch
of the Russian Medical Academy of Continuing
Professional Education of the Ministry
of Health of the Russian Federation,
Penza, Russian Federation,
e-mail: trudoc747@rambler.ru,
ORCID: 0009-0000-9638-4843

Субботина Татьяна Игоревна, доктор
медицинских наук, заведующий кафедрой
общей патологии, профессор, Тульский
государственный университет,
г. Тула, Российская Федерация,
e-mail: mbd2@rambler.ru,
ORCID: 0000-0002-3217-8191

Tatyana I. Subbotina, Doctor of Sciences
(Medical), Head of the Department of General
Pathology, Professor, Tula State University,
Tula, Russian Federation,
e-mail: mbd2@rambler.ru,
ORCID: 0000-0002-3217-8191

Починина Наталья Константиновна,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой оториноларингологии
и сурдологии-оториноларингологии,
Пензенский институт усовершенствования
врачей – филиал Российской медицинской
академии непрерывного профессионального
образования Министерства здравоохранения
Российской Федерации, г. Пенза,
Российская Федерация,
e-mail: nat-pochinina@yandex.ru,
ORCID: 0000-0002-2305-9668

Natalia K. Pochinina, Candidate of Sciences,
(Medical), Associate Professor, Head
of Department of Otorhinolaryngology and Sign
Language-Otorhinolaryngology, Penza Institute
of Advanced Medical Training is a branch
of the Russian Medical Academy of Continuing
Professional Education of the Ministry
of Health of the Russian Federation
Penza, Russian Federation,
e-mail: nat-pochinina@yandex.ru,
ORCID: 0000-0002-2305-9668

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-58-73>



УДК 681.586.48

О влиянии неточностей изготовления конструктивных элементов пьезопреобразователя на длительность акустического зондирующего импульса

С. И. Коновалов¹ ✉, М. С. Вечёра¹, Р. С. Коновалов^{1,2},
В. М. Цаплев¹, З. М. Юлдашев¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, г. Санкт-Петербург 197022, Российская Федерация

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
пр-т Московский, д. 9, г. Санкт-Петербург 190031, Российская Федерация

✉ e-mail: sikonovalov.eut@gmail.com

Резюме

Цель исследования – определить длительность излучаемых пьезоэлектрическим преобразователем акустических сигналов при малых отклонениях (увеличении или уменьшении) толщины согласующего слоя и его удельного акустического сопротивления от оптимальных значений.

Методы. Объект исследований – пьезоэлектрические преобразователи пластинчатого типа, нагруженные на водную среду. Для расчета использован метод эквивалентных схем пьезопреобразователей и спектральный метод на основе преобразований Фурье. Методом эквивалентных схем определяются частотные характеристики пьезопреобразователей. Для импульса электрического возбуждения конкретной формы с помощью прямого преобразования Фурье определяется его спектральная функция. Обратным преобразованием Фурье находится вид зондирующего акустического импульса. На основании анализа импульсного режима работы пьезопреобразователей определяются зависимости длительностей зондирующего сигнала от оптимальных значений волновой толщины согласующего слоя и его удельного акустического сопротивления.

Результаты. На основе анализа работы пьезопреобразователей выделены основные причины нарушения идентичности их свойств. Для различных степеней демпфирования пьезопреобразователя определены формы зондирующих сигналов, излучаемых в воду. Проведена оценка влияния неточностей изготовления слоя на длительность зондирующего сигнала. Определена длительность излучаемых пьезоэлектрическим преобразователем акустических сигналов при малых отклонениях (увеличении или уменьшении) толщины согласующего слоя и его удельного акустического сопротивления от оптимальных значений.

Заключение. Полученные результаты предназначены для оценки качества заготовок конструктивных элементов пьезопреобразователей при их изготовлении малыми партиями, когда неизбежны погрешности соблюдения толщины согласующего слоя и значения его удельного акустического сопротивления как внутри одной партии, так и между партиями.

Ключевые слова: неразрушающий контроль; пьезоэлектрический преобразователь; зондирующий акустический импульс.

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

Для цитирования: О влиянии неточностей изготовления конструктивных элементов пьезопреобразователя на длительность акустического зондирующего импульса / С. И. Коновалов, М. С. Вечёра, Р. С. Коновалов, В. М. Цаплев, З. М. Юлдашев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 2. С. 58–73. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-58-73>

Поступила в редакцию 11.04.2025

Подписана в печать 09.05.2025

Опубликована 30.06.2025

On the influence of manufacturing inaccuracies of the structural elements of a piezoelectric transducer on the duration of an acoustic probing pulse

Sergey I. Konovalov¹✉, Mikhail S. Vechera¹, Roman S. Konovalov^{1,2},
Valery M. Tsaplev¹, Zafar M. Yuldashev¹

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5/F Professora Popova Str., St. Petersburg 197022, Russian Federation

² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
9 Moskovsky Ave., St. Petersburg 190031, Russian Federation

✉ e-mail: sikonovalov.eut@gmail.com

Abstract

The purpose of the research is to determine the duration of acoustic signals emitted by a piezoelectric transducer with small deviations (increase or decrease) in the thickness of the matching layer and its specific acoustic resistance from the optimal values.

Methods. The object of the study is plate-type piezoelectric transducers loaded onto an water medium. The calculation was performed using the equivalent circuit method of piezoelectric transducers and the spectral method based on Fourier transforms. The equivalent circuit method is used to determine the frequency characteristics of piezoelectric transducers. For an electrical excitation pulse of a specific shape, its spectral function is determined using the direct Fourier transform. The type of the probing acoustic pulse is found using the inverse Fourier transform. Based on the analysis of the pulsed operating mode of piezoelectric transducers, the dependences of the probing signal durations on the optimal values of the wave thickness of the matching layer and its specific acoustic resistance are determined.

Results. Based on the analysis of the operation of piezoelectric transducers, the main causes of violation of the identity of their properties are identified. For different degrees of damping of the piezoelectric transducer, the shapes of the probing signals radiated into water are determined. The effect of inaccuracies in the manufacture of the layer on the

duration of the probing signal is assessed. The duration of acoustic signals emitted by a piezoelectric transducer is determined with small deviations (increase or decrease) in the thickness of the matching layer and its specific acoustic resistance from the optimal values.

Conclusion. The obtained results are intended to assess the quality of blanks of structural elements of piezoelectric transducers during their manufacture in small batches, when errors in maintaining the thickness of the matching layer and the value of its specific acoustic resistance are inevitable both within one batch and between batches.

Keywords: non-destructive testing; piezoelectric transducer; acoustic pulse probe.

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

For citation: Konovalov S.I., Vechera M.S., Konovalov R.S., Tsaplev V.M., Yuldashev Z.M. On the influence of manufacturing inaccuracies of the structural elements of a piezoelectric transducer on the duration of an acoustic probing pulse. *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.* 2025;15(2):58-73. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-58-63>

Received 11.04.2025

Accepted 09.05.2025

Published 30.06.2025

Введение

В настоящее время методы неразрушающего контроля (НК) применяются практически во всех отраслях народного хозяйства. Среди различных видов НК акустический контроль занимает одно из лидирующих положений, что объясняется целым рядом его достоинств, среди которых можно выделить относительную простоту, дешевизну, возможность одностороннего доступа к объекту контроля, безопасность для персонала, получение результатов контроля в режиме реального времени и т. д. Существует большое количество вариантов реализации упомянутого вида контроля, однако, общим для них является наличие электроакустических преобразователей, предназначенных для излучения и приема акустических сигналов. Эти преобразователи могут строиться на различных физических принципах. Можно выделить ряд обзорных публикаций, касающихся следующих физических принци-

пов построения преобразователей, например: пьезоэлектрические [1], электромагнитно-акустические [2], с использованием лазерного возбуждения [3] и др. В последние годы активно развиваются емкостные микромашинные ультразвуковые преобразователи [4], являющиеся электростатическими преобразователями. Наибольшее распространение получили пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП). Это объясняется широтой и универсальностью их применения [5]. Конструктивно данный тип преобразователей использует в качестве активного элемента материалы из пьезоэлектрических монокристаллов [6], пьезокерамики [1], пьезополимеров [7] и др.

Значительную ценность для разработчиков пьезоаппаратуры НК представляют собой работы, посвященные рассмотрению подходов к исследованию и разработке ПЭП стержневого типа с амплитудно-фазовым возбуждением [8] и пластинчатого типа [9]. ПЭП

пластинчатого типа нашли активное применение не только для ультразвукового НК, но и в области толщинометрии [10]. Подобные ПЭП позволяют обеспечить получение короткого зондирующего сигнала на основе применения механического демпфирования и согласующих слоев [9], корректирующих электрических цепей [9; 11] и др.

Говоря о системном подходе к формированию зондирующих сигналов малой длительности, нельзя не упомянуть о применении сложных сигнальных последовательностей для возбуждения пьезоэлемента [9]. Также активно используются методы обработки измерительной информации [12]. Например, в толщинометрии разработаны методы для измерения скорости и затухания ультразвука [13]. Их можно разделить на три категории: классические методы определения времени прошедшего через образец сигнала, основанные на пороговой или пиковой оценке сигнала [13]; методы кросс-корреляции (фазовой корреляции [12], кросс-корреляции с лазерным зондированием [14] и кросс-корреляции на основе преобразования Гильберта [15]); методы оценки параметров, основанные на моделях эхосигналов. Целью последней группы методов является разработка более точных моделей эхосигналов [16] и более эффективных и точных алгоритмов их оптимизации [17; 18]. По сравнению с пороговыми и корреляционными методами методы оценки на основе моделей эхосигналов не только обладают высокой точностью

обнаружения, но и ярко выраженной способностью к помехоустойчивости.

В практике акустического НК довольно часто применяется иммерсионный вариант контроля, когда ультразвуковой сигнал вводится в изделие через слой жидкости (например, воды) определенной толщины. При нагрузке на жидкие среды весьма распространенным является использование преобразователей с согласующим четвертьволновым слоем и демпфером. Это необходимо для лучшего согласования активного элемента (он обычно выполняется из пьезокерамики) с акустической нагрузкой. Наиболее часто применяемая конструкция ПЭП, предназначенного для целей иммерсионного контроля, содержит в своем составе активный элемент, демпфер и согласующий слой (два слоя используются редко). Вопросы разработки ПЭП, в т. ч. и иммерсионных, технологии их изготовления и измерения основных рабочих параметров подробно рассмотрены в научно-технической литературе [19]. Следует сказать, что при проектировании многоканальных автоматизированных дефектоскопических установок важным обстоятельством является соблюдение идентичности параметров ПЭП, входящих в их состав. Это во многом определяется точностью изготовления некоторых конструктивных элементов ПЭП. Особую значимость указанный фактор имеет при изготовлении ПЭП малыми партиями.

Широкое применение демпфированных преобразователей, вероятно,

можно объяснить относительной простотой их изготовления, дешевизной, высокой степенью идентичности характеристик при серийном производстве. Наиболее часто используются демпферы с порошковыми наполнителями. В них применяются композитные материалы, состоящие из рассеивателей и связующего компонента. Они широко используются в искателях дефектоскопов и акустических зондов, применяемых в аппаратуре медико-биологической диагностики. Требования к демпферам не являются жесткими. По данным [19], они вполне удовлетворительно работают уже в случае, при котором значение их эффективного удельного акустического сопротивления близко к 0,35 от значения удельного акустического сопротивления пьезокерамики. Достижение этого условия легко выполнимо при изготовлении демпферов. Именно поэтому на идентичность свойств ПЭП при их изготовлении малыми партиями влияют в первую очередь не свойства демпферов. Она определяется точностью соблюдения параметров согласующих слоев при изготовлении их внутри партии и между партиями.

Известно, что согласующие слои выполняют свои функции при соблюдении двух условий [19]:

а) их толщина должна составлять четверть длины волны в материале слоя на рабочей частоте ПЭП;

б) удельное акустическое сопротивление слоя $Z_{\text{сл}}$ должно удовлетворять условию $Z_{\text{сл}} = \sqrt{Z_{\text{пз}} Z_{\text{н}}}$, где $Z_{\text{сл}}$, $Z_{\text{пз}}$ и

$Z_{\text{н}}$ – удельные акустические сопротивления материалов слоя, пьезоэлемента и акустической нагрузки. Естественно, что нарушение перечисленных условий влечет за собой снижение эффективности работы ПЭП.

Говоря о качественной работе согласующих слоев, необходимо отметить, что при выпуске ПЭП малыми партиями причинами отсутствия идентичности ПЭП как внутри одной партии, так и между партиями часто могут являться:

– несоблюдение идентичности толщины согласующих слоев. Разброс в толщинах слоев происходит при шлифовке заготовок. Они наклеиваются в количестве нескольких десятков штук на планшайбу и далее обрабатываются с применением шлифовального порошка на станке, аналогичном обычному гончарному кругу. При этом далеко не всегда удается даже внутри одной партии обеспечить одинаковую толщину каждой заготовки. Это происходит и в том случае, когда используются так называемые «паразитные» прокладки (их наклеивают по краям планшайбы, чтобы избежать разброса в толщине слоев вследствие прижима планшайбы к вращающемуся столу с различной силой). Естественно, между партиями также наблюдается разброс толщин слоев;

– невозможность соблюдения (между различными партиями изготавливаемых ПЭП) полной идентичности смеси, которая предназначена для изготовления (после ее полимеризации) заготовок слоев. Это сказывается на

значении удельных акустических сопротивлений материала используемых согласующих слоев. В качестве этого материала часто используются акриловые пластмассы с добавлением мелкодисперсного порошка маршалита. Указанное обстоятельство приводит к разбросу значений удельного акустического сопротивления согласующих слоев между различными партиями ПЭП.

Будем оптимальными называть такие параметры слоев, которые отвечают выполнению названных условий.

Целью настоящей работы является проведение оценок допустимых отклонений указанных параметров согласующих слоев от их оптимальных значений с целью отбраковки заготовок слоев на ранних стадиях изготовления ПЭП.

Материалы и методы

Будем рассматривать демпфированную пьезокерамическую пластину, нагруженную на водную среду через согласующий четвертьволновый слой. В качестве материала пьезокерамики выберем, например, ЦТБС-3. Схема рассматриваемой задачи показана ниже (рис. 1). Введем следующие обозначения: z_d , z_k , z_{cl} и z_b – удельные акустические сопротивления демпфера, керамики, слоя и воды соответственно. Известно, что $z_b = 1,5 \cdot 10^6$ Па·с/м. Электрическим возбуждающим сигналом служит подаваемое на пьезоэлемент напряжение U .

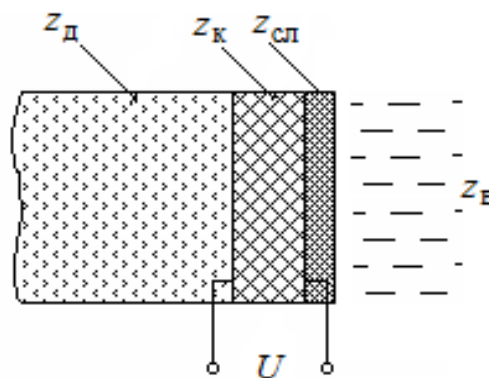


Рис. 1. Геометрическая модель задачи

Fig. 1. Geometric model of the problem

Пусть пьезокерамическая пластина возбуждается импульсом электрического напряжения в виде одного полупериода синусоиды на собственной частоте (частоте антирезонанса). Задача сводится к определению формы акустического зондирующего сигнала, т. е. акустического импульса колебательной скорости, излучаемого в водную среду. Методика определения такого сигнала подробно представлена в литературе, например в [20]. Она состоит в использовании аппарата эквивалентных схем пьезопреобразователей и применении спектрального метода на основе преобразований Фурье. С помощью схем-аналогов определяется частотная характеристика ПЭП. Затем, задавшись формой электрического возбуждающего сигнала, с помощью прямого преобразования Фурье определяется его спектральная функция. Далее, с помощью обратного преобразования Фурье находится вид излучаемого сигнала. Длительность этого импульса τ_n будем определять по уровню -20 дБ. Для

решения задачи в наиболее общем виде целесообразно использовать безразмерное время $T = t/(T_0/2)$ (t – физическое время, T_0 – период антирезонансной частоты). Это позволит оценивать длительность зондирующего сигнала не единицами времени, а числом полупериодов колебаний пластины на собственной частоте.

Результаты и их обсуждение

Выше были сформулированы две довольно частые причины отсутствия высокой степени идентичности ПЭП, выпускаемых малыми партиями. Целесообразно рассмотреть их отдельно друг от друга.

Причина № 1. С целью удобства обсуждения и интерпретации численных

результатов целесообразно ввести новый параметр α . Он будет характеризовать отклонение в процентах (в большую или меньшую стороны) толщины согласующего слоя от толщины, соответствующей четверти длины волны в материале слоя. Так, например, значение $\alpha = 0$ будет означать, что толщина слоя точно соответствует четвертьволновой. При $\alpha = \pm 5\%$ можно говорить о том, что толщина «ушла» в большую или меньшую сторону на одну двадцатую. Если $\alpha = \pm 10\%$, то отклонение толщины слоя от четверти длины волны составляет одну десятую и т. п. На рисунке 2 показаны зависимости $\tau_n(\alpha)$ для различных степеней демпфирования ПЭП.

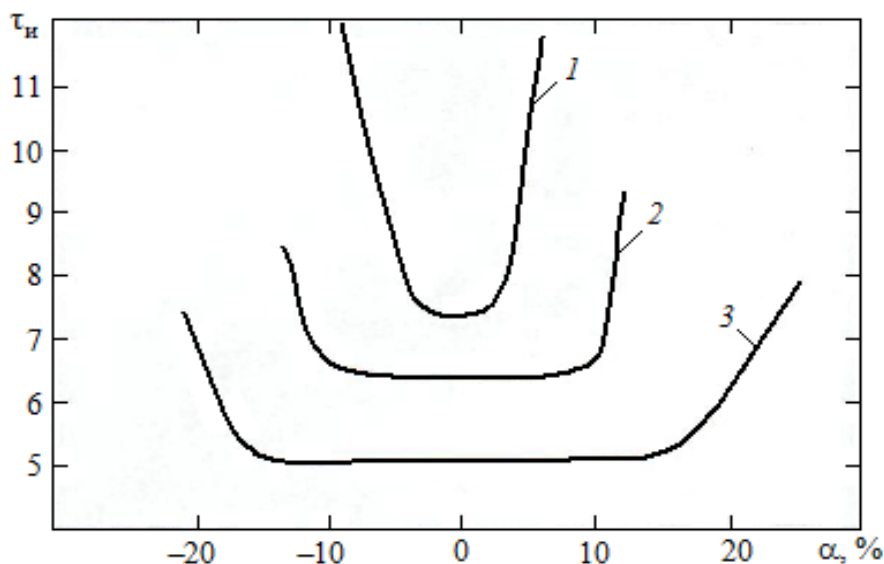


Рис. 2. Зависимость $\tau_n(\alpha)$ при различных значениях Z_d : кривая 1 – $z_d = 0$; 2 – $z_d = 5 \cdot 10^6$ Па·с/м; 3 – $z_d = 10 \cdot 10^6$ Па·с/м

Fig. 2. Dependence $\tau_n(\alpha)$ for different values of Z_d : curve 1 – $z_d = 0$; 2 – $z_d = 5 \cdot 10^6$ Pa·s/m; 3 – $z_d = 10 \cdot 10^6$ Pa·s/m

Из анализа материала, представленного на рисунке 2, можно сделать некоторые выводы. Так, форма кривой 1 (она соответствует случаю $z_d = 0$) позволяет утверждать, что при $z_d = 0$ минимум сигнала, соответствующий случаю, при котором толщина слоя точно равна четверти длины волны ($\alpha = 0$), составляет 7,5 полупериода колебаний на собственной (антирезонансной) частоте пластины. Очень малые отклонения α от значения $\alpha = 0$ влекут за собой возрастание длительности зондирующего импульса. Допустимые отклонения, при которых можно условно полагать, что акустический сигнал еще не растет, по длительности, составляют всего лишь около $\pm 4\%$. Возрастание параметра z_d приводит к менее заметной зависимости τ_n от α . Примером тому может служить поведение кривой 2 (она соответствует случаю $z_d = 5 \cdot 10^6$ Па·с/м). Даже при $\alpha \approx \pm(8-10)\%$ длительность импульса практически не возрастает относительно ее минимального значения в 6,5 полупериода. При $z_d = 10 \cdot 10^6$ Па·с/м (кривая 3) можно считать, что даже

$\alpha \approx \pm 15\%$ не ведет к увеличению τ_n , которая в этом случае составляет около пяти полупериодов колебаний на собственной частоте пластины. Стоит заметить, что отмеченные малые изменения параметра α не влекут за собой изменений в значениях амплитуд акустических сигналов. Не изменяется и основная часть импульсов. Некоторые отличия наблюдаются лишь в «хвосте» сигнала. Наличие пологих участков на кривых 1–3 объясняется тем, что амплитуды отдельных (заклучительных) полупериодов излучаемых сигналов (их длительность измеряется по уровню -20 дБ) в указанных диапазонах изменения параметра α еще не достигает 0,1 от максимума.

В таблице 1 подробно представлен целый ряд промежуточных значений удельных акустических сопротивлений демпфера и соответствующих им значений параметра α .

Значения z_d , превышающие $10 \cdot 10^6$ Па·с/м и соответствующие им значения параметра α , в таблице 1 не представлены, поскольку в этом случае возникновение технологических трудностей, связанных с изготовлением заготовок для согласующих слоев, становится маловероятным.

Таблица 1. Значения z_d и соответствующие им допустимые значения параметра α

Table 1. Values of z_d and corresponding permissible values of the parameter α

$z_d = 10^{-6}$, Па·с/м / $z_d = 10^{-6}$, Pa·s/m	0	3	5	7	10
α , %	± 4	± 6	± 10	± 12	± 15

На рисунке 2 показаны зависимости, отражающие изменения длительности зондирующего сигнала от значений параметра α при различных степенях демпфирования активного элемента ПЭП. Определенный интерес могут

представить значения длительностей сигналов при отсутствии согласующего слоя, когда используется только механические демпфирование. Так, в таблице 2 приведены значения длительностей акустических импульсов для различных z_d .

Таблица 2. Значения $\tau_{и}$ при отсутствии согласующего слоя для различных z_d

Table 2. Values of $\tau_{и}$ the absence of a matching layer for various z_d

$z_d = 10^{-6}$, Па·с/м / $z_d = 10^{-6}$, Pa·s/m	0	5	10	15	20
$\tau_{и}$ τ_p	Более 20	11,4	6,6	5,3	4,2

Можно видеть, что отсутствие согласующего слоя весьма заметно сказывается на работе ПЭП. Стоит также заметить, что для случая, при котором $z_d = z_k$ (гипотетический вариант реализации ПЭП), длительность сигнала составляет $\tau_{и} = 2,7$ полупериода.

Причина № 2. Будем по-прежнему расчетное исследование зависимостей длительностей зондирующих сигналов от значений удельных акустических сопротивлений согласующих слоев при различных степенях демпфирования активного элемента ПЭП проводить, используя методику описанную выше. Это позволит определять формы излучаемых в исследуемую среду акустических сигналов. На основании обработки полученных результатов можно построить семейство кривых, приведенных на рисунке 3.

При изготовлении иммерсионных преобразователей обычно ограничиваются степенями демпфирования пьезоэлемента $z_d = (8-10) \cdot 10^6$ Па·с/м. Это позволяет, с одной стороны, обеспечить уже достаточно серьезное демпфирование активного элемента ПЭП, а с другой – еще не требует использования специальных технологий и материалов, необходимых к применению для получения более значительных z_d . Данное обстоятельство объясняет ограничение рассмотрения z_d указанным значением.

Из данных, приведенных на рисунке 3, видно, что при $z_d = 0$ (кривая 1) минимально достижимая длительность зондирующего сигнала составляет примерно 8 полупериодов. Это наблюдается при $z_{сл}$, равном $4,25 \cdot 10^6$ Па·с/м.

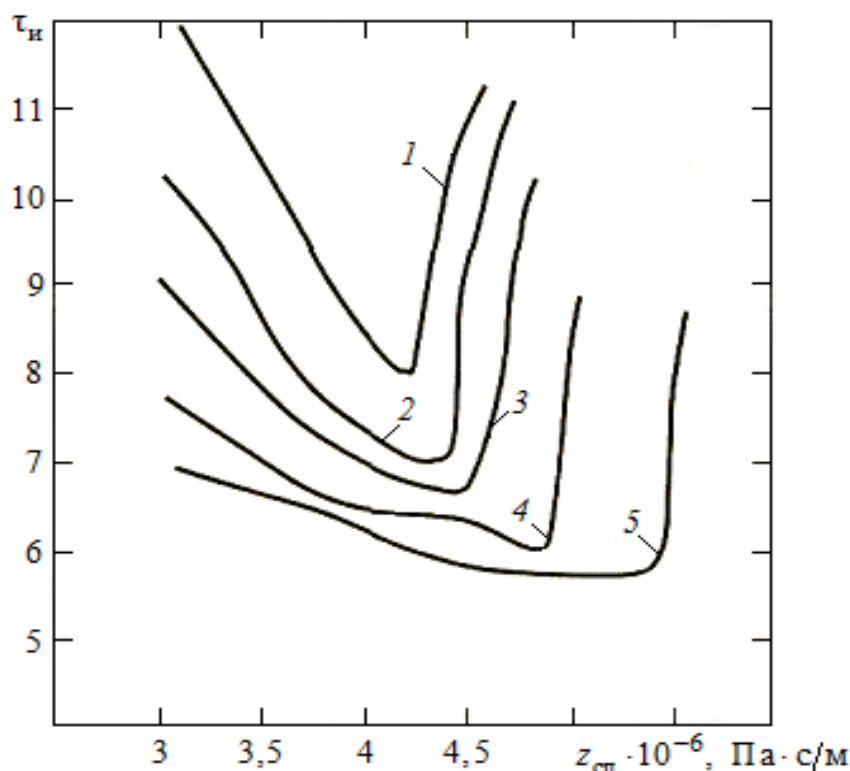


Рис. 3. Зависимости длительностей излучаемых сигналов τ_n от значений удельных акустических сопротивлений слоев при различных значениях z_d : кривая 1 соответствует $z_d = 0$; 2 – $z_d = 2 \cdot 10^6$ Па·с/м; 3 – $z_d = 4 \cdot 10^6$ Па·с/м; 4 – $z_d = 6 \cdot 10^6$ Па·с/м; 5 – $z_d = 8 \cdot 10^6$ Па·с/м

Fig. 3. Dependences of the durations of emitted signals on the values of τ_n specific acoustic resistances of layers at different values of z_d : curve 1 corresponds to $z_d = 0$; 2 – $z_d = 2 \cdot 10^6$ Pa·s/m; 3 – $z_d = 4 \cdot 10^6$ Pa·s/m; 4 – $z_d = 6 \cdot 10^6$ Pa·s/m; 5 – $z_d = 8 \cdot 10^6$ Pa·s/m

Отклонение z_d в сторону увеличения или уменьшения даже на очень малые величины неизбежно влечет за собой возрастание длительности зондирующего сигнала, т. е. возможный диапазон изменения $z_{сл}$, не вызывающий увеличения τ_n , оказывается крайне узким. Необходимо ввести некоторый критерий, определяющий нижнюю и верхнюю границы изменения диапазона $z_{сл}$. Договоримся считать, что длительность сигнала увеличивается незначительно, если

это увеличение не превышает половину полупериода сигнала. Эту величину будем считать критерием, определяющим допустимое увеличение длительности τ_n . Пусть z_n и z_v соответствуют нижней и верхней границам диапазона допустимого изменения $z_{сл}$. Эти границы могут быть определены из анализа материалов, представленных на рисунке 3 (см. кривые 1–5). Они приведены в ниже (табл. 3).

Таблица 3. Допустимые границы диапазонов изменения $z_{сл}$ при различных значениях z_d

Table 3. Permissible limits of the ranges of change $Z_{сЛ}$ for different values of $Z_{д}$

$z_{д} \cdot 10^{-6}$, Па·с/м $z_{д} \cdot 10^{-6}$, Pa·s/m	0	2	4	6	8
$z_{н} \cdot 10^{-6}$, Па·с/м $z_{н} \cdot 10^{-6}$, Pa·s/m	4	3,8	3,9	3,8	4
$z_{в} \cdot 10^{-6}$, Па·с/м $z_{в} \cdot 10^{-6}$, Pa·s/m	4,3	4,4	4,6	4,9	5,4

Представленные в таблице 3 результаты могут играть роль оценочных значений границ допустимых диапазонов изменения удельного акустического сопротивления заготовок для изготовления согласующего слоя.

Выводы

Таким образом, на основании расчетного исследования работы ПЭП в импульсном режиме получены оценочные значения допустимых отклонений толщины согласующего слоя от четвертьволновой, не вызывающие увеличения длительности излучаемых иммерсионным ПЭП акустических сигналов.

Определены границы диапазонов изменения удельных акустических сопротивлений согласующего слоя, при которых длительность зондирующих сигналов сохраняется. Указанные исследования осуществлены для различных степеней демпфирования пластинчатых ПЭП. Результаты работы могут быть использованы при изготовлении малых партий преобразователей, предназначенных для осуществления неразрушающего контроля. Они могут быть применены для отбраковки заготовок согласующих четвертьволновых слоев на ранних стадиях изготовления ПЭП.

Список литературы

1. Uchino K. Piezoelectric Devices for Sustainability Technologies // Encyclopedia of Sustainable Technologies (Second Edition). 2024. Vol. 3. P. 463–477. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90386-8.00014-0>
2. Memon A., Alhems L. EMAT Generated Guided Waves in Pipes: A Review // e-Journal of Nondestructive Testing. 2023. Vol. 28(10). <https://doi.org/10.58286/28711>
3. Application of Laser Ultrasonic Testing Technology in The Characterization of Material Properties: A Review / Y. Lian, F. Du, L. Xie, Q. Hu, P. Jin, Y. Wang, Z. Lu. //

Measurement. 2024. Vol. 234. P. 114855. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114855>Get rights and content

4. Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers: Technology and Application / M. Sabri Salim, M. F. A. Malek, R. B. W. Heng, K. M. Juni, N. Sabri // Journal of Medical Ultrasound. 2012. Vol. 20, is. 1. P. 8–31. <https://doi.org/10.1016/j.jmu.2012.02.001>

5. Applications of Piezoelectric-Based Sensors, Actuators, and Energy Harvesters / M. Ali Mangi, H. Elahi, A. Ali, H. Jabbar, A. Bin Aqeel, A. Farrukh, S. Bibi, W. A. Altabey, S. A. Kouritem, M. Noori // Sensors and Actuators Reports. 2025. Vol. 9. P. 100302. <https://doi.org/10.1016/j.snr.2025.100302>

6. Piezoelectric Single Crystal Ultrasonic Transducers for Biomedical Applications / Q. Zhou, K. Ho Lam, H. Zheng, W. Qiu, K. Kirk Shung // Progress in Materials Science. 2014. Vol. 66. P. 87–111. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.06.001>

7. Piezoelectric Films for High Frequency Ultrasonic Transducers in Biomedical Applications / Q. Zhou, S. Lau, D. Wu, K. Kirk Shung // Progress in Materials Science. 2011. Vol. 56, is. 2. P. 139–174. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.09.001>

8. Степанов Б. Г. Пьезоэлектрические преобразователи стержневого и пластинчатого типов с амплитудно-фазовым возбуждением. Задачи синтеза и анализа. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. 220 с.

9. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Физические основы работы и проектирования импульсных пьезопреобразователей в задачах измерения и контроля. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 228 с.

10. Review of Ultrasonic-Based Technology for Oil Film Thickness Measurement in Lubrication / P. Dou, Y. Jia, P. Zheng, T. Wu, M. Yu, T. Reddyhoff, Z. Peng // Tribology International. 2022. Vol. 165. P. 107290. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107290>

11. Precise experimental determination of electrical equivalent circuit parameters for ultrasonic piezoelectric ceramic transducers from their measured characteristics / P. P. Janů, J. Bajer, P. Dyčka, R. Bystřický // Ultrasonics. 2021. Vol. 112. P. 106341. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106341>

12. Liu W., Li D., Xie W. A Novel Time-of-Flight Difference Determination Method for Ultrasonic Thickness Measurement With Ultrasonic Echo Onset Point Detection // Applied Acoustics. 2025. Vol. 233. P. 110605. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2025.110605>

13. Eason T. J., Bond L. J., Lozev M. G. Structural health monitoring ultrasonic thickness measurement accuracy and reliability of various time-of-flight calculation methods // 42nd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Incorporating the 6th European-American Workshop on Reliability. Minneapolis, 2016. Vol. 1706. P. 200003. <https://doi.org/10.1063/1.4940647>

14. A High-Resolution Ultrasonic Ranging System Using Laser Sensing and a Cross-Correlation Method / L. Jia, B. Xue, S. Chen, H. Wu, X. Yang, J. Zhai, Z. Zeng // *Applied Sciences*. 2019. Is. 9. P. 1483. <https://doi.org/10.3390/app9071483>
15. Cross Correlation-Based Ultrasonic Gas Flow Sensor With Temperature Compensation / J. R. G. Oya, E. H. Fort, D. N. Miguel, A. S. Rojas, R. G. Carvajal, F. M. Chavero // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2023. Vol. 72. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3293139>
16. Dual Gaussian attenuation model of ultrasonic echo and its parameter estimation / D. Wang, Z. Wang, P. Li, Y. Chen, H. Li // *AIP Advances*. 2019. N 9(5). P. 055213. <https://doi.org/10.1063/1.5095994>
17. Parameter estimation for ultrasonic echo signals through improved matching pursuit and flower pollination algorithms / M. Chang, Z. Lu, Q. Huang, C. Yang // *Measurement*. 2022. Vol. 194. P. 111010. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111010>
18. Xiong J., Mao P., Li X. Enhancing Ultrasonic Time-of-Flight Estimation Using Adaptive Differential Evolution and Levenberg–Marquardt Algorithm // *IEEE Sensors Journal*. 2024. Vol. 24, N 2. P. 1224–1232. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3324502>
19. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под общ. ред. И. Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
20. Коновалов С. И., Юлдашев З. М. Формирование зондирующих сигналов пьезоэлектрических преобразователей для ультразвукового контроля // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. 2023. Т. 26, № 1. С. 87–98. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2023-26-1-87-98>

References

1. Uchino K. Piezoelectric Devices for Sustainability Technologies. *Encyclopedia of Sustainable Technologies (Second Edition)*. 2024;3:463–477. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90386-8.00014-0>
2. Memon A., Alhems L. EMAT Generated Guided Waves in Pipes: A Review. *e-Journal of Nondestructive Testing*. 2023;28(10). <https://doi.org/10.58286/28711>
3. Lian Y., Du F., Xie L., Hu Q., Jin P., Wang Y., Lu Z. Application of Laser Ultrasonic Testing Technology in The Characterization of Material Properties: A Review. *Measurement*. 2024;234:114855. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114855>Get rights and content
4. Sabri Salim M., Malek M. F. A., Heng R. B. W., Juni K. M., Sabri N. Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers: Technology and Application. *Journal of Medical Ultrasound*. 2012;20(1):8–31. <https://doi.org/10.1016/j.jmu.2012.02.001>
5. Ali Mangi M., Elahi H., Ali A., Jabbar H., Aqeel Bin A., Farrukh A., Bibi S., Altabay W. A., Kouritem S. A., Noori M. Applications of Piezoelectric-Based Sensors, Actuators, and Energy Harvesters. *Sensors and Actuators Reports*. 2025;9:100302. <https://doi.org/10.1016/j.snr.2025.100302>

6. Zhou Q., Ho Lam K., Zheng H., Qiu W., Kirk K. Shung. Piezoelectric Single Crystal Ultrasonic Transducers for Biomedical Applications. *Progress in Materials Science*. 2014;66:87–111. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.06.001>
7. Zhou Q., Lau S., Wu D., Shung K. Kirk. Piezoelectric Films for High Frequency Ultrasonic Transducers in Biomedical Applications. *Progress in Materials Science*. 2011;56(2):139–174. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.09.001>
8. Stepanov B.G. Piezoelectric transducers of rod and plate types with amplitude-phase excitation. Problems of synthesis and analysis. Saint Petersburg: Izdatel'stvo SPbGETU "LETI"; 2019. 220 p. (In Russ.)
9. Konovalov S.I., Kuz'menko A.G. Physical foundations of operation and design of pulse piezoelectric transducers in measurement and control problems. Saint Petersburg: Izdatel'stvo SPbGETU "LETI"; 2016. 228 p. (In Russ.)
10. Dou P., Jia Y., Zheng P., Wu T., Yu M., Reddyhoff T., Peng Z. Review of Ultrasonic-Based Technology for Oil Film Thickness Measurement in Lubrication. *Tribology International*. 2022;165:107290. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107290>
11. Janů P.P., Bajer J., Dyčka P., Bystřický R. Precise experimental determination of electrical equivalent circuit parameters for ultrasonic piezoelectric ceramic transducers from their measured characteristics. *Ultrasonics*. 2021;112:106341. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106341>
12. Liu W., Li D., Xie W. A Novel Time-of-Flight Difference Determination Method for Ultrasonic Thickness Measurement With Ultrasonic Echo Onset Point Detection. *Applied Acoustics*. 2025;233:110605. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2025.110605>
13. Eason T.J., Bond L.J., Lozev M.G. Structural health monitoring ultrasonic thickness measurement accuracy and reliability of various time-of-flight calculation methods. In: *42nd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Incorporating the 6th European-American Workshop on Reliability*. Vol. 1706. Minneapolis; 2016. P. 200003. 2016;1706:200003. <https://doi.org/10.1063/1.4940647>
14. Jia L., Xue B., Chen S., Wu H., Yang X., Zhai J., Zeng Z. A High-Resolution Ultrasonic Ranging System Using Laser Sensing and a Cross-Correlation Method. *Applied Sciences*. 2019;(9):1483. <https://doi.org/10.3390/app9071483>
15. Oya J. R. G., Fort E. H., Miguel D. N., Rojas A. S., Carvajal R. G., Chavero F. M. Cross Correlation-Based Ultrasonic Gas Flow Sensor With Temperature Compensation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2023;72:1–4. <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3293139>
16. Wang D., Wang Z., Li P., Chen Y., Li H. Dual Gaussian attenuation model of ultrasonic echo and its parameter estimation. *AIP Advances*. 2019;(9):055213. <https://doi.org/10.1063/1.5095994>

17. Chang M., Lu Z., Huang Q., Yang C. Parameter estimation for ultrasonic echo signals through improved matching pursuit and flower pollination algorithms. *Measurement*. 2022;194:111010. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111010>
18. Xiong J., Mao P., Li X. Enhancing Ultrasonic Time-of-Flight Estimation Using Adaptive Differential Evolution and Levenberg–Marquardt Algorithm. *IEEE Sensors Journal*. 2024;24(2):1224–1232. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3324502>
19. Ermolov I.N. (ed.). Ultrasonic Piezoelectric Transducers for Nondestructive Testing. Moscow: Mashinostroenie; 1986. 280 p. (In Russ.)
20. Konovalov S.I., Yuldashev Z.M. Formation of Probing Signals of Piezoelectric Transducers for Ultrasonic Testing. *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika = Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2023;26(1):87–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2023-26-1-87-98>

Информация об авторах / Information about the Authors

Коновалов Сергей Ильич, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: sikonovalov.eut@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5033-344X

Sergey I. Konovalov, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: sikonovalov.eut@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5033-344X

Вечёра Михаил Сергеевич, аспирант, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: vechiora.mihail@yandex.ru, ORCID: 0009-0003-0018-6810

Mikhail S. Vechera, Post-Graduate Student, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: vechiora.mihail@yandex.ru, ORCID: 0009-0003-0018-6810

Коновалов Роман Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроакустики и ультразвуковой техники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина); доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: rskonovalov@etu.ru, ORCID: 0000-0002-0155-2718

Roman S. Konovalov, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"; Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: rskonovalov@etu.ru, ORCID: 0000-0002-0155-2718

Цаплев Валерий Михайлович, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: valery@convergences-fr.ru, ORCID: 0000-0002-7386-7233

Valery M. Tsaplev, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: valery@convergences-fr.ru, ORCID: 0000-0002-7386-7233

Юлдашев Зафар Мухамедович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой биотехнических систем, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: yuld@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1075-3420

Zafar M. Yuldashev, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of the Department of Biotechnical Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: yuld@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1075-3420

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-74-89>



УДК 621.391

Влияние качества функционирования устройства автоматической регулировки усиления на помехоустойчивость приёма сигналов цифровых линий связи и коррекция межсимвольных искажений

Д. С. Коптев¹ ✉, В. Г. Довбня¹

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

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Резюме

Целью исследования является теоретическая оценка потенциальной помехоустойчивости приёма сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией в цифровых линиях связи при условии неидеальности параметров устройства автоматической регулировки усиления.

Методы исследования опираются на теорию потенциальной помехоустойчивости многопозиционных цифровых сигналов, основы квазиоптимального приёма, методы математического моделирования сигналов. Допущено предположение, что синтезатор колебаний гетеродинов устройств восстановления несущей и тактовой синхронизации в радиоприёмной системе функционирует идеально, т. е. фазы выходного колебания синтезатора колебаний гетеродина и выходного колебания устройства восстановления несущей равны нулю, отсутствует неустойчивость периода следования тактовых импульсов, а частотная характеристика канала соответствует условию Найквиста.

Результаты. Разработаны комплексные аналитические модели, позволяющие оценить потенциальную помехоустойчивость приёма многопозиционных КАМ-сигналов с учётом влияния факторов статической и динамической ошибок функционирования устройства автоматической регулировки усиления. Показано, что требования к точности установки уровня сигнала на входе решающего устройства радиоприёмной системы ужесточаются с увеличением кратности модуляции. Так, результаты математического моделирования показали, что для видов модуляции КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256 и КАМ-1024 статическая ошибка установки уровня сигнала на входе устройства принятия решения должна составлять не более 0,27, 0,12, 0,054 и 0,027 дБ соответственно. Указанные значения, как показали проведенные расчеты и полученные теоретические зависимости, позволяют получить приемлемые значения уровня эквивалентных энергетических потерь, который не превышает 0,3 дБ.

Заключение. Показано, что разработка и проектирование адаптивных корректоров межсимвольных искажений являются весьма актуальными направлениями повышения помехоустойчивости радиоприёмных систем, позволяющих компенсировать неидеальность характеристик различных структурно-функциональных элементов демодуляторов многопозиционных цифровых сигналов, в том числе и устройства автоматической регулировки усиления. В корректорах демодуляторов сложных сигналов наиболее целесообразно применение критерия минимума среднего квадрата ошибки. Наименьший уровень квадрата ошибки в диапазоне низких отношений сигнал / шум обеспечивает алгоритм, являющийся комбинацией модифицированного старт-стопного алгоритма и двухрежимного алгоритма с постоянным модулем.

Ключевые слова: цифровые линии связи; радиоприёмная система; сигнал с квадратурной амплитудной манипуляцией; демодулятор многопозиционных сигналов; автоматическая регулировка усиления; адаптивный корректор; межсимвольные искажения.

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

Для цитирования: Коптев Д. С., Довбня В. Г. Влияние качества функционирования устройства автоматической регулировки усиления на помехоустойчивость приёма сигналов цифровых линий связи и коррекция межсимвольных искажений // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 2. С. 74–89. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-74-89>

Поступила в редакцию 16.04.2025

Подписана в печать 13.05.2025

Опубликована 30.06.2025

Influence of the quality of functioning of the automatic gain control device on the noise immunity of reception of signal digital communication lines and correction of intersymbol distortions

Dmitry S. Koptev¹✉, Vitaly G. Dovbnya¹

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

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is a theoretical assessment of the potential noise immunity of quadrature amplitude modulation signals in digital communication lines under the condition of imperfect parameters of the automatic gain control device.

Methods. The research methods are based on the theory of potential noise immunity of multi-position digital signals, the fundamentals of quasi-optimal reception, and methods of mathematical modeling of signals. It is assumed that the synthesizer of heterodyne oscillations of the carrier and clock synchronization devices in the radio receiving system function ideally, i.e. the phases of the output oscillation of the heterodyne oscillation synthesizer and the output oscillation of the carrier recovery device are zero, there is no instability in the clock pulse repetition period, and the frequency response of the channel corresponds to the Nyquist condition.

Results. Complex analytical models have been developed that allow estimating the potential noise immunity of multi-position QAM signals reception taking into account the influence of static and dynamic error factors in the operation of the automatic gain control device. It has been shown that the requirements for the accuracy of setting the signal level at the input of the decision device of the radio receiving system become more stringent with increasing modulation multiplicity. Thus, the results of mathematical modeling have shown that for the QAM-16, QAM-64, QAM-256 and QAM-1024 modulation types, the static error in setting the signal level at the input of the decision device should be no more than 0,27, 0,12, 0,054 and 0,027 dB, respectively. The specified values, as shown by the calculations and the obtained theoretical dependencies, allow obtaining acceptable values of the equivalent energy loss level, which does not exceed 0,3 dB.

Conclusion. It is shown that the development and design of adaptive correctors of intersymbol distortions is a very relevant direction for increasing the noise immunity of radio receiving systems, allowing to compensate for the imperfection of the characteristics of various structural and functional elements of multi-position digital signal demodulators, including the automatic gain control device. In correctors of complex signal demodulators, the most appropriate criterion is the minimum mean square error. The lowest level of the square error in the range of low signal-to-noise ratios is provided by an algorithm that is a combination of a modified start-stop algorithm and a two-mode algorithm with a constant modulus.

Keywords: digital communication lines; radio receiving system; quadrature amplitude-shift keying signal; multi-position signal demodulator; automatic gain control; adaptive corrector; intersymbol distortion.

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

For citation: Koptev D.S., Dovbnya V.G. Influence of the quality of functioning of the automatic gain control device on the noise immunity of reception of signal digital communication lines and correction of intersymbol distortions. *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*. 2025;15(2):74–89. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-74-89>

Received 16.04.2025

Accepted 13.05.2025

Published 30.06.2025

Введение

Приём сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ) требует преодоления априорной неопределённости относительно медианного ослабления сигнала в канале распространения радиоволн [1]. Данная задача в демодуляторе радиоприёмных систем (РПС) решается устройством автоматической регулировки усиления (АРУ), показателем качества функционирования которого являются статическая и флуктуационная ошибки установки уровня сигнала на входе устройства принятия решения РПС [2]. Одним из основных факторов, в значительной степени влияющих на качество приема высокоскоростных сигналов цифровых линий связи (ЦЛС), является межсимвольная интерференция, вызванная многолучевым распространением радиоволн, а также неидеальностью частотных характеристик передающего и приемного устройств ЦЛС [3]. Это, в свою очередь, объективно обуславливает необходимость применения в демодуляторах ЦЛС адаптивных корректоров межсимвольных искажений [4].

Коррекция искажений сигнала может быть осуществлена как во временной, так и в частотной областях и реализована либо в полосе канала, либо в полосе модулирующих частот [5]. Реализация адаптивного корректора межсимвольных искажений во временной области и в полосе модулирующих частот отличается меньшей сложностью [6].

Для коррекции искажений могут быть использованы как линейные, так и нелинейные с решающей обратной связью корректоры. Нелинейные корректоры наиболее пригодны для каналов с большими амплитудными искажениями и, кроме того, менее чувствительны к ошибке установки фазы тактового колебания. Однако эффективность применения таких корректоров при низких отношениях сигнал / шум невысока из-за увеличения ошибок ввиду наличия обратной связи [7].

Материалы и методы

Для оценки влияния качества функционирования устройства АРУ на помехоустойчивость приема КАМ будем полагать, что синтезатор колебаний

гетеродинов, устройства восстановления несущей и тактовой синхронизации в модели РПС функционирует идеально, т. е. фаза выходного колебания синтезатора колебаний гетеродина $\psi_R(t) = 0$, фаза выходного колебания устройства восстановления несущей $\psi_V(t) = 0$ и нестабильность периода следования тактовых импульсов $\tau_R(t) = 0$, а частотная характеристика канала соответствует условию Найквиста – выражение [8].

С учетом сделанных допущений выражения для огибающих квадратурных составляющих сигнала на входе устройства принятия решений (УПР) и правило максимума правдоподобия соответственно могут быть записаны в следующем виде:

$$U_x(t) = \mu [dG_\Sigma(t)m_r + N_{Rx}(t)], \quad (1)$$

$$U_y(t) = \mu [dG_\Sigma(t)n_r + N_{Ry}(t)], \quad (2)$$

где μ – коэффициент передачи непрерывного канала; $G_\Sigma(t)$ – огибающая импульсной характеристики непрерывного канала; $N_{Rx}(t), N_{Ry}(t)$ – огибающие квадратурных составляющих аддитивного белого гауссова шума, имеющего нулевое математическое ожидание и дисперсию $\sigma_N^2 = N_0 B_R$; m_r, n_r – амплитуды синфазной и квадратурной составляющих сигналов [9].

$$\begin{aligned} & m_r \left(m_r - \frac{\mu m_r}{2} \right) + n_r \left(n_r - \frac{\mu n_r}{2} \right) + \\ & \frac{m_r N_{Rx0} + n_r N_{Ry0}}{dG_{\Sigma 0}} > m_p \left(m_r - \frac{\mu m_p}{2} \right) + \\ & + n_p \left(n_r - \frac{\mu n_p}{2} \right) + \frac{m_p N_{Rx0} + n_p N_{Ry0}}{dG_{\Sigma 0}}, \\ & r \neq p, \end{aligned} \quad (3)$$

где $G_{\Sigma 0} = G_\Sigma(\tau_0)$ – значение огибающей импульсной характеристики канала в момент принятия решения; $N_{Rx0} = N_{Rx}(\tau_0)$, $N_{Ry0} = N_{Ry}(\tau_0)$ – значения огибающих квадратурных составляющих шума в момент принятия решения [10].

Решение в РПС принимается отдельно по каждой из огибающей квадратурных составляющих сложного цифрового сигнала согласно нижепредставленному алгоритму:

$$\begin{cases} \text{sgn}(m_p - m_r) \left[0,5\mu(m_p - m_r) + \right. \\ \left. + (\mu - 1)m_r \right] > N_{Rx0} / dG_{\Sigma 0}, \\ \text{sgn}(n_p - n_r) \left[0,5\mu(m_p - m_r) + \right. \\ \left. + (\mu - 1)m_r \right] > N_{Ry0} / dG_{\Sigma 0}, m \neq p. \end{cases} \quad (4)$$

где $\text{sgn}(x)$ – знаковая функция;

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x = 0, \\ -1, & x < 0. \end{cases}$$

Тогда условная вероятность ошибки в принимаемом символе будет рассчитываться по следующей формуле:

$$P_s(\mu) \approx 2P(\mu) = 2P\{\xi > \operatorname{sgn}(p-r) \times [0,5\mu(p-r) + (\mu-1)r]\}, \quad (5)$$

где $r, p = \{-(L-1), -(L-3), \dots, (L-1)\}$,
 $m \neq p$; $\xi = N_{Rx0} / dG_{\Sigma 0}$ – центрирован-

ная случайная величина, имеющая нормальное распределение [11].

Матрица условных вероятностей и выражение для среднего значения условной вероятности ошибки в рассматриваемом случае примет следующий вид:

$$\|P_{p,m}(\mu)\| = \left\| \begin{array}{cccc} P_{-(L-1),-(L-3)}(\mu) & P_{-(L-1),-(L-5)}(\mu) & \dots & P_{-(L-1),L-1}(\mu) \\ P_{-(L-3),-(L-1)}(\mu) & P_{-(L-3),-(L-5)}(\mu) & \dots & P_{-(L-3),L-1}(\mu) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{L-1,-(L-1)}(\mu) & P_{L-1,-(L-3)}(\mu) & \dots & P_{L-1,L-3}(\mu) \end{array} \right\|, \quad (6)$$

$$P(\mu) = \sum_r \sum_p P(r)P(p/r, \mu) = \frac{1}{L} \sum_p \sum_r Q\left\{\sqrt{\frac{3}{M-1}} h \operatorname{sgn}(p-r) [0,5\mu(p-r) + (\mu-1)r]\right\}, \quad (7)$$

где M – позиционность сигнала; L – число значений амплитуд огибающих квадратурных составляющих КАМ-сигнала, равное $\sqrt{M}$ если $\log_2 M$ четное, и $\sqrt{1,125M}$, если $\log_2 M$ нечетное;

$$Q(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_y^\infty \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx - \text{гауссов интеграл ошибок [12].}$$

Полагая элементы матрицы (6), для которых $|0,5(p-r)| \neq 1$, равными нулю и опуская промежуточные преобразования, получим модифицированное выражение для определения условной вероятности битовой ошибки в следующем виде:

$$P_b(\mu) = \frac{1}{L \log_2 L} \sum_l \operatorname{erfc} \times \left\{ \sqrt{\frac{1,5}{M-1}} h [1 + (\mu-1)l] \right\}, \quad (8)$$

где – дополнительная функция ошибок; отношение сигнал / шум, обеспечивающее заданную вероятность битовой ошибки [13].

В связи с тем, что для идеального устройства АРУ $\mu = 1$, выражение (8) целесообразно переписать в виде

$$P_b(\chi) = \frac{1}{L \log_2 L} \sum_l \operatorname{erfc} \left\{ \sqrt{\frac{1,5}{M-1}} h [1 + \chi l] \right\}, \quad (9)$$

где $\chi = 1 - \mu$ – ошибка установки уровня сигнала на входе УПР.

Выражения (8) и (9) позволяют оценить влияние статической ошибки установки уровня сигнала на входе устройства принятия решения демодулятора на помехоустойчивость приема КАМ-сигналов.

Одним из методов оценки влияния флуктуационной ошибки функционирования устройства АРУ является усреднение условной вероятности ошибки $P_b(\mu)$ по всем набору заданных

значений амплитуды многопозиционного сигнала:

$$P_b = \int_{1-\mu_1}^{1+\mu_1} P_b(\mu) w(\mu) d\mu, \quad (10)$$

где $\mu_1 = 2/L$; $w(\mu)$ – функция плотности распределения ошибки оценки уровня принимаемого сигнала (в общем случае имеет вид нормального закона распределения) [14].

Результаты и их обсуждение

С использованием аналитических выражений (8) и (9) итерационным методом в среде *MathCad 11* получены графические зависимости эквивалентных энергетических потерь от статической и флуктуационной ошибок установки уровня сигнала на входе устройства принятия решения РПС цифровых линий связи (рис. 1 и 2).

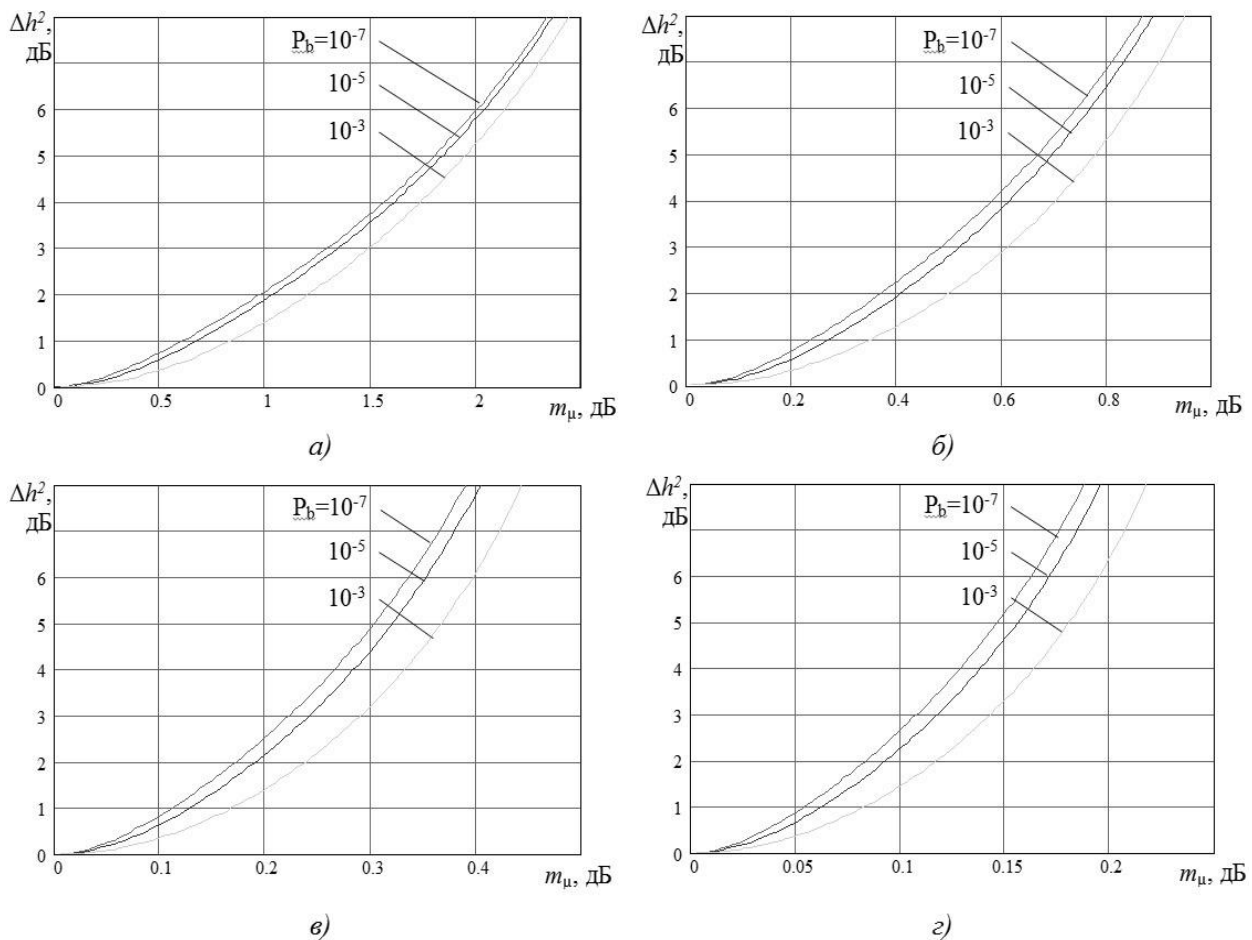


Рис. 1. Графические зависимости оценки эквивалентных энергетических потерь от статической ошибки установки уровня сигнала на входе решающего устройства для сигналов: а – QAM-16; б – QAM-64; в – QAM-256; з – QAM-1024

Fig. 1. Graphic dependencies of the assessment of equivalent energy losses on the static error of setting the signal level at the input of the decision device for signals: а – QAM-16; б – QAM-64; в – QAM-256; з – QAM-1024

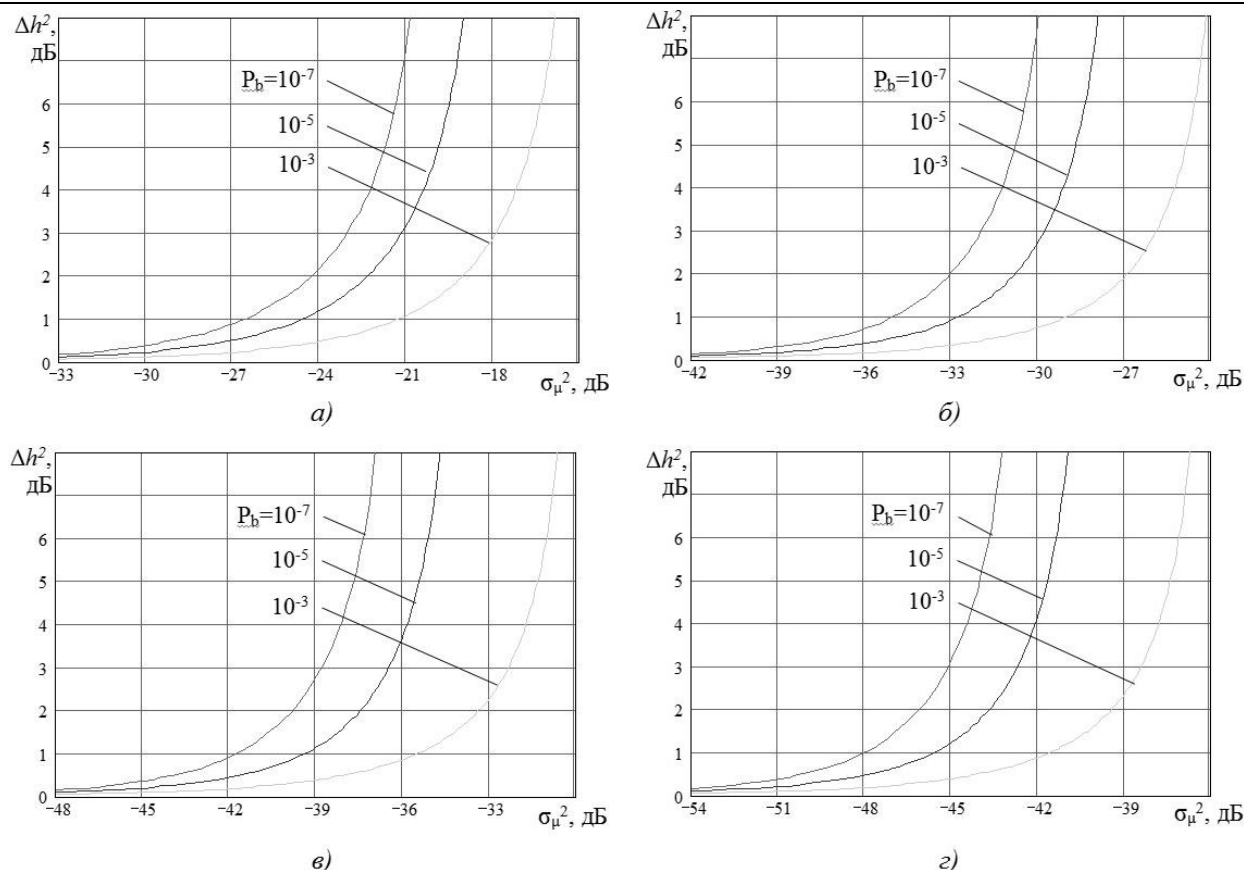


Рис. 2. Графические зависимости оценки величины эквивалентных энергетических потерь от джиттера сигнала на входе решающего устройства для сигналов: а – КАМ-16; б – КАМ-64; в – КАМ-256; г – КАМ-1024

Fig. 2. Graphic dependencies of the estimate of the equivalent energy loss value from the signal jitter at the input of the decision device for signals: а – КАМ-16; б – КАМ-64; в – КАМ-256; г – КАМ-1024

Из анализа графиков следует, что:

- повышение позиционности цифровых сигналов способствует ужесточению требований к точности установки уровня сигнала на входе устройства принятия решения, которые возрастают пропорционально шагу изменения кратности модуляции;

- для видов модуляции КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256 и КАМ-1024 допустимый уровень эквивалентных энергетических потерь (от 0,2 до 0,3 дБ) обеспечивается при статической ошибке установки уровня сигнала на входе устройства принятия решения не более

0,27, 0,12, 0,054 и 0,027 дБ и флуктуациях не более –30, –39, –45 и –51 дБ соответственно.

Реализация вышеуказанных достаточно высоких требований обуславливает необходимость применения как минимум двух контуров автоматической регулировки усиления, первый из которых обеспечивает отслеживание неглубоких (± 1 дБ) быстрых замираний сигнала с частотой от 2 до 10 Гц, второй – более медленных замираний с частотой менее 2 Гц и глубиной до ± 10 дБ. При этом второй контур регулировки усиления целесообразно реализовать в виде

цифровой астатической системы с интегратором в цепи обратной связи.

Разработанная аналитическая модель и полученные графические зависимости позволяют адекватно оценить степень влияния статической и динамической ошибок функционирования устройства автоматической регуляции усиления на потенциальную помехоустойчивость приема сложных сигналов и, таким образом, теоретически обосновать требования к точности поддержания уровня принимаемого сигнала на входе устройства принятия решения демодулятора сигналов с многопозиционными видами модуляции.

В условиях сильных искажений характеристики группового времени запаздывания наиболее эффективно применение дробно-интервальных, в частности $T/2$ -интервальных, линейных корректоров. Кроме того, такие корректоры не требуют применения формирующего входного фильтра, в меньшей степени повышают уровень шума при коррекции амплитудных искажений и менее чувствительны к фазе сигнала дискретизации.

В общем случае выходной сигнал корректора на k -м интервале может быть записан в виде

$$\dot{y}_k = \sum_{i=0}^{N_c-1} \dot{c}_i \dot{x}_{k-i} - \sum_{j=1}^{N_b} \dot{b}_j \hat{y}_{k-j}, \quad (11)$$

где N_c , N_b – порядок трансверсальных фильтров соответственно в прямой и обратных цепях корректора; $\dot{c}_i$, $\dot{b}_j$ – комплексные весовые коэффициенты фильтров соответственно в прямой и

обратных цепях корректора ($i = 0, 1 \dots N_c - 1; j = 1, 2 \dots N_b$); $\dot{x}_k$, $\hat{y}_k$ – выборки комплексных входного сигнала и сигнала на выходе решающего устройства.

Выражение (11) описывает сигнал на выходе нелинейного корректора с решающей обратной связью. Если второй член в выражении (11) положить равным нулю, то получим формулу для сигнала на выходе линейного корректора.

В матричной форме выражение (11) будет выглядеть следующим образом:

$$\dot{y}_k = X_k C^T - \hat{Y}_{k-1} B^T, \quad (12)$$

где $X_k = [\dot{x}_k, \dot{x}_{k-1}, \dots, \dot{x}_{k-N_c+1}]^T$ – вектор-столбец отсчетов входного процесса; $C = [\dot{c}_0, \dot{c}_1, \dots, \dot{c}_{N_c-1}]^T$ – вектор-столбец весовых коэффициентов трансверсального фильтра в прямой цепи; $\hat{Y}_{k-1} = [\hat{y}_{k-1}, \hat{y}_{k-2}, \dots, \hat{y}_{k-N_b}]^T$ – вектор-столбец решений; $B = [\dot{b}_1, \dot{b}_2, \dots, \dot{b}_{N_b}]^T$ – вектор-столбец весовых коэффициентов фильтра в обратной цепи [15].

Задача проектирования адаптивных корректоров содержит две частные задачи: первая – выбор структуры (порядка) комплексных трансверсальных фильтров в цепи прямой и обратной связи; вторая – выбор критерия оптимальности и алгоритма расчета весовых коэффициентов.

Анализ [16; 17; 18; 19] показал, что оптимальной структуры, минимизирующей вероятность ошибки в широком диапазоне отношений сигнал/шум и возможных видов импульсной характе-

ристики канала, не существует. В связи с этим порядок (количество весовых коэффициентов) используемых в корректорах трансверсальных фильтров должен выбираться с точки зрения достижения компромисса между снижением влияния МСИ и уровнем дополнительного шума, обусловленного случайными блужданиями значений весовых коэффициентов. В настоящее время максимально необходимая глубина коррекции межсимвольных искажений для большинства практически встречающихся случаев приема сигналов цифровых спутниковых линий связи не превышает 8 символов, для приема сигналов цифровых радиорелейных линий связи – 16, а в случаях приема сигналов с многопозиционными видами модуляции от КАМ-256 и выше или наличия глубоких (до 10 дБ) частотно-селективных замираний – не менее 32.

Одними из наиболее распространенных критериев оптимальности корректоров межсимвольных искажений являются минимум среднего квадрата ошибки и минимум наименьших квадратов [20].

Корректоры, использующие критерий минимума среднего квадрата ошибки, отличаются более высокой устойчивостью функционирования в условиях низких отношений сигнал / шум и повышенной МСИ и относительно малым объемом вычислительных затрат, а реализующие критерий минимума наименьших квадратов – быстрой сходимостью итерационных алгоритмов.

В связи с тем, что среда распространения радиоволн характеризуется относительно медленными замираниями, что не предъявляет высоких требований к скорости адаптации, и учитывая существенно более высокий объем вычислительных затрат для алгоритмов, реализующих критерий наименьших квадратов, в корректорах демодуляторов сложных сигналов наиболее целесообразно применение критерия минимума среднего квадрата ошибки.

В общем случае оптимальное значение вектора весовых коэффициентов $W_{\text{опт}}$ является решением уравнения [21]:

$$\nabla J(W) = 0, \quad (13)$$

где $J(W) = \overline{|\dot{\epsilon}_k|^2}$ – показатель качества критерия МСКО;

$$W = [\dot{c}_0, \dot{c}_1, \dots, \dot{c}_{N_c-1}, \dot{b}_1, \dot{b}_2, \dots, \dot{b}_{N_b}]^T;$$

$\dot{\epsilon}_k = \dot{I}_k - \dot{Y}_k$ – ошибка при приеме k -го информационного символа; $\dot{I}_k$ – переданный (эталонный) k -й информационный символ; ∇ – оператор градиента.

Все методы решения (алгоритмы адаптации) уравнения (13) делятся на прямые и итерационные [20].

Прямые методы предусматривают нахождение оптимальных весовых коэффициентов из решения системы линейных уравнений, матричный вид которой

$$W_{\text{опт}} = R^{-1}P, \quad (14)$$

где R – ковариационная матрица отсчетов входного процесса; P – вектор коэффициентов взаимной корреляции между

передаваемым (эталонным) информационным символом и отсчетами входного процесса.

Итерационные методы, реализуемые методом кратчайшего спуска, обеспечивают пошаговый расчет весовых коэффициентов корректора по формуле

$$\begin{cases} \hat{C}_{k+1} = \hat{C}_k - \mu \cdot \dot{\epsilon}_k \cdot X_k^*, \\ \hat{B}_{k+1} = \hat{B}_k - \mu \cdot \dot{\epsilon}_k \cdot \hat{Y}_{k-1}^*, \end{cases} \quad (15)$$

где μ – достаточно малый положительный коэффициент, определяющий скорость сходимости адаптивных корректоров межсимвольных искажений.

Отсутствие априорной информации об эталонном сигнале не позволяет использовать вышеуказанные методы для решения уравнения (14), что объективно обуславливает необходимость применения алгоритмов «слепого» выравнивания.

Из алгоритмов «слепого» выравнивания благодаря простоте реализации наибольшее распространение получили следующие стохастические градиентные алгоритмы: Годарда (алгоритм с постоянным модулем) [22] и старт-стопный [23].

Анализ [22; 23] показал, что наименьший уровень квадрата ошибки в диапазоне низких отношений сигнал / шум обеспечивает алгоритм, являющийся комбинацией модифицированного старт-стопного алгоритма и двухрежимного алгоритма с постоянным модулем.

Комбинированный алгоритм адаптации выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{c}_{i,k+1} = \dot{c}_{i,k} - \mu \cdot \dot{\epsilon}_{Gk} \cdot x_{k-i}, \\ \dot{b}_{j,k+1} = \dot{b}_{j,k} - \mu \cdot f_k \cdot \dot{\epsilon}_{Gk} \cdot y_{k-j}; \end{cases} \quad y_k \notin D_n; \quad (16)$$

$$\begin{cases} \dot{c}_{i,k+1} = \dot{c}_{i,k} - \mu \cdot \dot{\epsilon}_{Gnk} \cdot x_{k-i}, \\ \dot{b}_{j,k+1} = \dot{b}_{j,k} - \mu \cdot f_k \cdot \dot{\epsilon}_{Gnk} \cdot y_{k-j}, \end{cases} \quad y_k \in D_n, \quad (17)$$

где

$$\dot{\epsilon}_{Gnk} = \dot{y}_k \left(|\dot{y}_k|^2 - R_{2n} \right); \quad (18)$$

$$R_{2n} = |\hat{y}_k|^2, \quad (19)$$

D_n – область близких решений с центрами в точках $-d(L-1), -d(L-3), \dots, d(L-1)$ и размером $\pm\Delta$ (рис. 3, на примере амплитуд квадратурных составляющих сигнала КАМ-64).

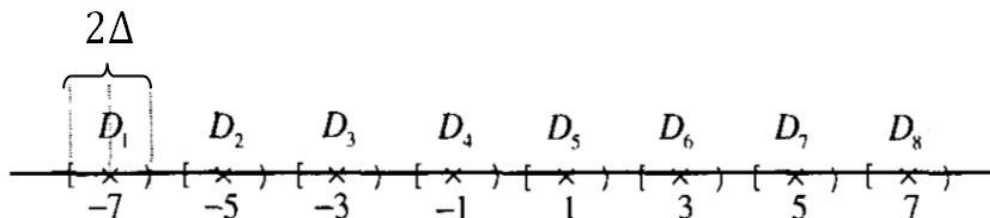


Рис. 3. Область близких решений для сигнала КАМ-64

Fig. 3. Region of close solutions for the QAM-64 signal

Выводы

Таким образом, разработанная аналитическая модель и полученные графические зависимости позволяют оценить степень влияния статической и динамической ошибок функционирования устройства автоматической регулировки усиления на помехоустойчивость приема сложных сигналов и, таким образом, теоретически обосновать требования к точности поддержания уровня принимаемого сигнала на входе устройства принятия решения демодулятора сигналов с многопозиционными видами модуляции. Показано, что в корректорах демодуляторов сложных сигналов наиболее целесообразно применение критерия минимума среднего квадрата ошибки. Наименьший уровень квадрата ошибки в диапазоне низких отношений

сигнал / шум обеспечивает алгоритм, являющийся комбинацией модифицированного старт-стопного алгоритма и двухрежимного алгоритма с постоянным модулем.

Модификация приведенного выше комбинированного алгоритма, заключающаяся в использовании селективной обратной связи по решению, позволит повысить устойчивость и точность функционирования адаптивного корректора межсимвольных искажений в области низких отношений сигнал / шум. Использование таких корректоров позволяет существенно повысить исправляющую способность в условиях сильных межсимвольных искажений, при которых амплитудные отклонения принимаемых отсчётов превышают размеры зон принятия решения.

Список литературы

1. Макаров С. Б., Завьялов С. В., Овсянникова А. С. Оптимизация формы сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией с использованием критерия заданной скорости спада уровня внеполосных излучений // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 4. С. 6–22. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-4-6-22>
2. Ершов И. А., Данишевский Н. С. Методика расчета системы автоматической регулировки усиления в усилителях приёмных устройств // Computing, Telecommunications and Control. 2022. Т. 15, № 3. С. 22–37. <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.15302>
3. Алёшинцев А. В. Оптимизация структуры многочастотного модема // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15, № 6. С. 10–19.
4. Белов А. Д., Полушин П. А. Методы «мягкой» и «жесткой» коррекции для борьбы с межсимвольными искажениями цифровых сигналов // Проектирование и технология электронных средств. 2020. № 1. С. 33–37.
5. Полушин П. А., Архипов Н. А., Шалина В. В. Эффективность «физической» и «логической» коррекции межсимвольных искажений цифровых сигналов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2023. № 2(50). С. 21–28. <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2023-2-21-28>

6. Лобов Е. М., Алаа А. Обзор существующих методов коррекции межсимвольных искажений радиосигналов в цифровых системах связи с использованием машинного обучения // Телекоммуникации и информационные технологии. 2023. Т. 10, № 1. С. 109–119.

7. Полушин П. А., Архипов Н. А., Шалина В. В. Модификация метода кодирования при борьбе с межсимвольными искажениями цифровых сигналов с модуляцией QPSK // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2023. № 1(49). С. 33–40. <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2023-1-33-40>

8. Шарамет А. В., Азаров И. С. Особенности работы приемного тракта в многоканальной радиолокационной станции с временной автоматической регулировкой усиления // Цифровая обработка сигналов. 2023. № 3. С. 47–51.

9. Довбня В. Г., Коптев Д. С. Влияние качества функционирования гетеродинов на помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией // Радиотехника. 2020. Т. 84, № 9(17). С. 40–48. [https://doi.org/10.18127/j00338486-202009\(17\)-03](https://doi.org/10.18127/j00338486-202009(17)-03)

10. Довбня В. Г., Коптев Д. С. Основные направления повышения помехозащищенности радиоприёмных 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.

11. Evaluation of the value of equivalent energy losses due to the quality of frequency synthesis functioning in digital communication systems with quasi-coherent reception of signals with quadrature amplitude keypad / V. G. Dovbnya, D. S. Koptev, L. R. Herman Floresmilo, G. I. Podkhaldin // T-Comm. 2023. Vol. 17, N 5. P. 58–63. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2023-17-5-58-63>

12. Бобровский В. И., Латыпова С. С. Модификация сигнальной конструкции с тридцати двух позиционной квадратурной амплитудной манипуляцией // Техника средств связи. 2018. № 4(144). С. 36–47.

13. Оценка помехоустойчивости беспроводных цифровых систем связи при воздействии помех по побочным каналам приема / В. Г. Довбня, А. А. Гуламов, И. Г. Бабанин, Д. С. Коптев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8, № 3(28). С. 35–40.

14. Расчет вероятности ошибки в канале с общими k - μ -замираниями и аддитивным белым гауссовским шумом / Н. В. Савищенко, А. Исса, А. С. Ишимов, Е. А. Попов // Радиотехника. 2023. Т. 87, № 3. С. 109–121. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202303-11>

15. Санников В. Г., Волчков В. П. Повышение помехоустойчивости модема с оптимальными финитными сигналами, не вызывающими межсимвольную интерференцию в линейном канале связи // Телекоммуникации и информационные технологии. 2019. Т. 6, № 2. С. 19–28.
16. Аджемов А. С., Кудряшова А. Ю. Исследование минимизации вероятности ошибок, возникающих при четырехкратных методах дискретной модуляции // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2022. № 4. С. 31–33.
17. Дегтярев А. Н., Конева С. А. Минимизация вероятности ошибки при взвешенном приеме сообщения с двухпозиционной импульсно-кодовой манипуляцией в условиях межсимвольной интерференции // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.6.1>
18. Флакман А. Г., Сорокин И. С., Кокарев А. О. Минимизация вероятности ошибки на бит в многоэтапной релейной ММО-системе // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6, № 4. С. 36–44. <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2020-6-4-36-44>
19. Кудрявцев А. А., Шестаков О. В. Асимптотическое поведение функции потерь в методе мультипликативного масштабирования вейвлет-коэффициентов функции сигнала // Вестник Московского университета. Серия 15: Вычислительная математика и кибернетика. 2017. № 1. С. 16–9.
20. Анализ методов борьбы с межсимвольными искажениями в цифровых тропосферных линиях связи / А. И. Жирнов, Е. В. Орлов, В. Е. Егрюшев [и др.] // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 42. С. 874–879.
21. Особенности реализации демодулятора блочных сигналов с квадратурно-амплитудной модуляцией / О. И. Атакищев, К. Ю. Рюмшин, А. А. Амеленков, А. П. Журавлев // Известия Института инженерной физики. 2021. № 4(62). С. 16–19.
22. Система алгоритмов цифровой обработки сигнала для когерентной оптической связи / Т. О. Базаров, М. А. Сенько, Л. А. Самоделкин [и др.] // Журнал технической физики. 2024. Т. 94, № 6. С. 894–912. <https://doi.org/10.61011/JTF.2024.06.58131.3-24>
23. Принципы формирования сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием / Р. И. Кочубей, М. М. Бычковский, Н. Н. Зайкин [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 1. С. 134–141. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-1-134-135>

References

1. Makarov S.B., Zavyalov S.V., Ovsyannikova A.S. Optimization of the shape of signals with quadrature amplitude modulation using the criterion of a given rate of decay of the level of out-of-band emissions. *Computing, Telecommunications and Control = Proceedings of Russian Universities. Radio Electronics*. 2022;25(4):6–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-4-6-22>

2. Ershov I.A., Danishevsky N.S. Methodology for calculating the automatic gain control system in amplifiers of receiving devices. *Computing, Telecommunications and Control*. 2022;15(3):22–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.15302>

3. Alyoshintsev A.V. Optimization of the structure of a multi-frequency modem. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport = T-Comm: Telecommunications and Transport*. 2021;15(6):10–19. (In Russ.)

4. Belov A.D., Polushin P.A. Methods of "soft" and "hard" correction to combat intersymbol distortions of digital signals. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and Technology of Electronic Means*. 2020;(1):33–37. (In Russ.)

5. Polushin P.A., Arkhipov N.A., Shalina V.V. Efficiency of "physical" and "logical" correction of intersymbol distortions of digital signals. *Radio-tekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy = Radio Engineering and Telecommunication Systems*. 2023;(2):21–28. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2023-2-21-28>

6. Lobov E.M., Alaa A. Review of existing methods for correcting intersymbol distortions of radio signals in digital communication systems using machine learning. *Telekommunikatsii i informatsionnye tekhnologii = Telecommunications and Information Technologies*. 2023;10(1):109–119. (In Russ.)

7. Polushin P.A., Arkhipov N.A., Shalina V.V. Modification of the coding method in the fight against intersymbol distortions of digital signals with QPSK modulation. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy = Radio Engineering and Telecommunication Systems*. 2023;(1):33–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2023-1-33-40>

8. Sharamet A.V., Azarov I.S. Features of the receiving path in a multi-channel radar station with temporary automatic gain control. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital Signal Processing*. 2023;(3):47–51. (In Russ.)

9. Dovbnja V.G., Koptev D.S. Influence of the quality of heterodyne operation on the noise immunity of reception of signals with quadrature amplitude modulation. *Radiotekhnika = Radio Engineering*. 2020;84(9):40–48. (In Russ.) [https://doi.org/10.18127/j00338486-202009\(17\)-03](https://doi.org/10.18127/j00338486-202009(17)-03)

10. Dovbnja V.G., Koptev D.S. Main directions of increasing the noise immunity of radio receiving systems based on spatio-temporal processing of complex signals in the antenna device. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2020;10(1):36–50. (In Russ.)

11. Dovbnja V.G., Koptev D.S., Herman Floresmilo L.R., Podkhaldin G.I. Evaluation of the value of equivalent energy losses due to the quality of frequency synthesis functioning in digital communication systems with quasi-coherent reception of signals with quadrature amplitude keypad. *T-Comm*. 2023;17(5):58–63. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2023-17-5-58-63>

12. Bobrovsky V.I., Latypova S.S. Modification of a signal design with thirty-two-position quadrature amplitude keying. *Tekhnika sredstv svyazi = Communication Equipment*. 2018;(4):36–47. (In Russ.)

13. Dovbnja V.G., Gulamov A.A., Babanin I.G., Koptev D.S. Evaluation of noise immunity of wireless digital communication systems exposed to interference via side reception channels. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2018;8(3):35–40. (In Russ.)

14. Savishchenko N.V., Issa A., Ishimov A.S., Popov E.A. Calculation of the error probability in a channel with general κ - μ fading and additive white Gaussian noise. *Radiotekhnika = Radio Engineering*. 2023;87(3):109–121. (In Russ.) <https://doi.org/10.18127/j00338486-202303-11>

15. Sannikov V.G., Volchkov V.P. Increasing the noise immunity of a modem with optimal finite signals that do not cause intersymbol interference in a linear communication channel. *Telekommunikatsii i informatsionnye tekhnologii = Telecommunications and Information Technologies*. 2019;6(2):19–28. (In Russ.)

16. Adzhemov A.S., Kudryashova A.Yu. Study of minimizing the probability of errors arising from four-fold discrete modulation methods. *SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii = Microwave Engineering and Telecommunication Technologies*. 2022;(4):31–33. (In Russ.)

17. Degtyarev A.N., Koneva S.A. Minimizing the error probability in weighted reception of a message with two-position pulse-code manipulation under conditions of intersymbol interference. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2024;(6). (In Russ.) <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.6.1>

18. Flaksman A.G., Sorokin I.S., Kokarev A.O. Minimizing the bit error probability in a multi-stage relay MIMO system. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi = Proceedings of Educational Institutions of Communication*. 2020;6(4):36–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2020-6-4-36-44>

19. Kudryavtsev A.A., Shestakov O.V. Asymptotic behavior of the loss function in the method of multiplicative scaling of wavelet coefficients of the signal function. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 15: Vychislitel'naya matematika i kibernetika = Bulletin of Moscow University. Series 15: Computational Mathematics and Cybernetics*. 2017;(1):16–19. (In Russ.)

20. Zhirnov A.I., Orlov E.V., Egrushev V.E., et al. Analysis of methods for combating intersymbol distortions in digital tropospheric communication lines. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie = Innovations. Science. Education*. 2021;(42):874–879. (In Russ.)

21. Atakishchev O.I., Ryumshin K.Yu., Amelenkov A.A., Zhuravlev A.P. Features of the implementation of a block signal demodulator with quadrature-amplitude modulation. *Izvestiya Instituta inzhenernoi fiziki = Bulletin of the Institute of Engineering Physics*. 2021;(4):16–19. (In Russ.)

22. Bazarov T.O., Senko M.A., Samodelkin L.A., et al. A system of digital signal processing algorithms for coherent optical communications. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Journal of Technical Physics*. 2024;94(6):894–912. (In Russ.) <https://doi.org/10.61011/JTF.2024.06.58131.3-24>

23. Kochubey R.I., Bychkovsky M.M., Zaykin N.N., et al. Principles of signal generation with orthogonal frequency multiplexing. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical Sciences*. 2024;(1):134–141. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-1-134-135>

Информация об авторах / Information about the Authors

Коптев Дмитрий Сергеевич, старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: d.s.koptev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7759-579X

Dmitry S. Koptev, Senior Lecturer of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: d.s.koptev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7759-579X

Довбня Виталий Георгиевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vit_georg@mail.ru

Vitaly G. Dovbnya, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vit_georg@mail.ru

Разработка портативной системы для дифференцированной оценки стрессоустойчивости военнослужащих

Е. С. Щелканова¹✉, Е. А. Журбин¹, И. В. Маркин¹,
Г. М. Письменный¹, М. Р. Назарова¹

¹ Военный инновационный технополис «ЭРА»
Пионерский пр-т, д. 41, г. Анапа 353456, Российская Федерация

✉ e-mail: era_otd6@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Профессиональная деятельность военнослужащих напрямую связана с высоким уровнем психического и физического стресса. Негативными последствиями стресса у военнослужащих являются не только проблемы со здоровьем, но и риск срыва выполнения задач. Поэтому актуальной задачей становится разработка инструментов для оценки стрессоустойчивости у военнослужащих, в том числе в полевых условиях. Существующие комплексы для оценки стрессоустойчивости у военнослужащих, как правило, обладают следующими недостатками: крупногабаритность, недостаточная мобильность, обязательное подключение к компьютеру, установка специализированного программного обеспечения, относительно высокая стоимость, субъективный характер оценки, отсутствие дифференцированной оценки на страх и тревогу, имеющие различный морфофункциональный базис. Поэтому целью исследования является разработка прототипа портативной системы для дифференцированной оценки уровня стрессоустойчивости военнослужащих.

Методы. Модель оценки стрессоустойчивости – «предсказуемая – непредсказуемая угроза». Разработку электронной платы проводили с использованием современных систем автоматизированного проектирования: NI Multisim v 14.3, Micro-Cap v 12.2.0.5, KiCad v 8.0.6, Компас-График v 23, Mathcad v 15. Программная составляющая системы реализована при помощи Python v 3.10 и библиотек: PySide6 v 6.7.2, docx v 0.2.4, Docxcompose v 1.4.0, Cryptography v 43.0.0, SQLite v 3.47.0, Pyinstaller v 6.11.0. Корпус портативной системы смоделирован в программе Solidworks 2018. Программа IDEA Maker использована для преобразования трехмерной модели в управляющие команды 3D-принтера.

Результаты. Представлена концептуальная модель портативной системы для оценки стрессоустойчивости военнослужащих на основе модели оценки «предсказуемая – непредсказуемая угроза». На базе концептуальной модели реализован прототип данной системы.

Заключение. Внедрение в повседневную практику медицинской и психологической службы Вооруженных сил РФ портативной системы для дифференцированной оценки уровня стрессоустойчивости будет способствовать своевременному принятию мер по сохранению и укреплению здоровья личного состава, а также повышению эффективности военно-профессиональной деятельности, сохранению профессионального здоровья военнослужащих.

Ключевые слова: аверсивные реакции; военнослужащие; оценка; портативная система; стресс-тестирование; стрессоустойчивость; физиологические показатели.

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

Для цитирования: Разработка портативной системы для дифференцированной оценки стрессоустойчивости военнослужащих / Е. С. Щелканова, Е. А. Журбин, И. В. Маркин, Г. М. Письменный, М. Р. Назарова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 2. С. 90–107. [https://doi.org/ 10.21869/2223-1536-2025-15-2-90-107](https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-90-107)

Поступила в редакцию 06.04.2025

Подписана в печать 04.05.2025

Опубликована 30.06.2025

Development of a portable system for differentiated assessment of stress resistance of military personnel

Elena S. Shchelkanova¹✉, Evgeniy A. Zhurbin¹, Ilya V. Markin¹,
Grigory M. Pismennyi¹, Marina R. Nazarova¹

¹ Military Innovative Technopolis "ERA"
41 Pionerskiy Ave., Anapa 353456, Russian Federation

✉ e-mail: era_otd6@mil.ru

Abstract

Purpose of research. Professional activity of servicemen is directly related to high levels of mental and physical stress. Negative consequences of stress in servicemen are not only health problems, but also the risk of task failure. Therefore, the development of tools for assessing stress tolerance in military personnel, including in field conditions, becomes an urgent task. Existing complexes for assessing stress tolerance in servicemen, as a rule, have the following disadvantages: large size, insufficient mobility, mandatory connection to a computer, installation of specialised software, relatively high cost, subjective nature of assessment, lack of differentiated assessment for fear and anxiety, having different morphofunctional basis. Therefore, the aim of the study is to develop a prototype of a portable system for differentiated assessment of the level of stress tolerance of military personnel.

Methods. The stress tolerance assessment model is 'predictable-unpredictable threat'. The development of the electronic board was carried out using modern computer-aided design systems: NI Multisim v 14.3, Micro-Cap v 12.2.0.5, KiCad v 8.0.6, Compass-Graphic v 23, Mathcad v 15. The software component of the system is implemented using Python v 3.10 and libraries: PySide6 v 6.7.2, docx v 0.2.4, Docxcompose v 1.4.0, Cryptography v 43.0.0, SQLite v 3.47.0, Pyinstaller v 6.11.0. The housing of the portable system was modelled in Solidworks 2018 software. IDEA Maker software was used to convert the 3D model into 3D printer control commands.

Results. A conceptual model of a portable system for assessing stress tolerance of military personnel based on the predictable-unpredictable threat assessment model is presented. A prototype of this system was implemented based on the conceptual model.

Conclusion. The introduction of a portable system for differentiated assessment of stress tolerance into the daily practice of medical and psychological service of the Armed Forces of the Russian Federation will contribute to the timely adoption of measures to preserve and improve the health of personnel, as well as to improve the efficiency of military-professional activity, and to preserve the professional health of servicemen.

Keywords: *aversive reactions; military personnel; assessment; portable system; stress testing; stress tolerance; physiological indicators.*

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

For citation: Shchelkanova E.S., Zhurbin E.A., Markin I.V., Pismenniy G.M., Nazarova M.R. Development of a portable system for differentiated assessment of stress resistance of military personnel. *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.* 2025;15(2):90–107. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-90-107>

Received 06.04.2025

Accepted 04.05.2025

Published 30.06.2025

Введение

Профессиональная деятельность военнослужащих характеризуется чрезвычайно высокой ответственностью за принятие и реализацию решений, наличием угроз жизни и здоровью. Поэтому при комплектовании каждой воинской учетной специальности предъявляются специальные требования как к физическому и психическому здоровью кандидатов, так и к их знаниям, навыкам, умениям и профессионально важным качествам (ПВК).

Ввиду того, что стрессоустойчивость (СУ) является одним из важнейших ПВК военнослужащих моторно-волевого класса воинских должностей, динамическую оценку СУ необходимо осуществлять на всех этапах мониторинга профессиональной надежности военнослужащих: на этапе подготовки к выполнению боевой задачи; в ходе выполнения боевой задачи; в процессе медико-психологической реабилитации [1]. Поэтому актуальным становится разработка средств оценки уровня СУ в полевых условиях. Такие средства должны быть мобильными, иметь относительно небольшие массогабаритные параметры, иметь пылевлагозащиту,

работать автономно от аккумулятора и быть простыми в использовании.

Несмотря на достаточно жесткий в ряде случаев профессиональный психологический отбор и внимание к профессиональной подготовке, военнослужащие зачастую подвержены труднопредсказуемым срывам в физиологической и психоэмоциональной сферах [2], их игнорирование способно привести к долгосрочным проблемам с психическим здоровьем, иммунитетом и работоспособностью [3]. Своевременная профилактика острых форм боевой психической травмы напротив способна повысить адаптивность организма к воздействию экстремальных патогенных факторов [4], тем самым укрепив здоровье и боеспособность военнослужащего [5]. Следствием срывов военнослужащих являются критические ошибки [6], имеющие порой негативные последствия, как для жизни военнослужащего [7], так и для жизней окружающих его людей [8]. В современных условиях с учетом увеличения ударной мощи вооружения и затрат на подготовку высококвалифицированных кадров [9] цена таких ошибок многократно возрастает. Результаты практических исследований дают

возможность утверждать, что качественная психологическая подготовка и серьезная внутриличностная работа военнослужащего над собой позволят добиться морально-психологического превосходства над противником [10]. Поэтому актуальной является задача по разработке и внедрению новых технологий, методов и средств для дифференцированной оценки уровня СУ военнослужащих.

На сегодняшний день в Вооруженных силах РФ с целью определения уровня СУ и близких к ней характеристик военнослужащих используются, как правило, личностные опросники: «Адаптивность» А. Г. Маклакова и С. В. Чермянина, «Прогноз» Ю. А. Баранова и «Прогноз-2» В. Ю. Рыбникова, «Готовность к риску» А. М. Шуберта и др. Однако они не лишены недостатков: субъективность вводимых данных, риск возникновения случайных ошибок, отсутствие возможности дифференцированно оценивать реакцию на острую и потенциальную угрозы, имеющие различный морфофункциональный базис.

С целью объективизации оценки СУ военнослужащих следует применять комплекс не однокритериальных методик, ориентированных только на выбор обследуемого, а основываться на нескольких объективных физиологических показателях человека.

Целью исследования явилась разработка прототипа портативной системы для дифференцированной оценки уровня стрессоустойчивости военнослужащих.

Материалы и методы

Модель дифференцированной оценки СУ – «предсказуемая – непредсказуемая угроза» [11].

Программные обеспечения (ПО) для разработки электронной платы: NI Multisim v 14.3, Micro-Cap v 12.2.0.5, KiCad v 8.0.6, Компас-График v 23, Mathcad v 15.

ПО для реализации метода оценки СУ: Python v3.10 (использованные библиотеки: PySide6 v 6.7.2, docx v 0.2.4, docxcompose v 1.4.0, cryptography v 43.0.0, SQLite v3.47.0, pyinstaller v 6.11.0).

ПО для проектирования и печати прототипа корпуса: Solidworks 2018 и IDEA Maker. Модель 3D-принтера: Raise3DPro2Plus. Технология печати: FDM. Материал печати: нить из ABS диаметром 1,75 мм (Bestfilament). Тип постобработки: механическая.

Результаты и их обсуждение

На сегодняшний день существуют аппаратно-программные комплексы (АПК), реализующие мониторинг и оценку психофизиологических сигналов, такие как, например, «Здоровье-экспресс» [12], «Реакор» [13], программа автоматической речевой аналитики для цифровой оценки стрессовой нагрузки и психосоциального здоровья [14]. Каждый из этих комплексов имеет свои преимущества при решении задач по оценке уровня СУ. Сравнение основных характеристик данных АПК приведено ниже (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение характеристик АПК для оценки уровня СУ**Table 1.** Comparison of stress tolerance assessment systems

Название / Appellation	АПК «Здоровье-экспресс» исполнение / Hardware and software complex "Zdorov'e- Ekspress"	АПК «Реактор» / HSC "Reakor"	Программа автоматической речевой аналитики / Automatic speech analytics program	АПК «Портативная система для дифференцированной оценки стрессоустойчивости» / HSC "portable system for assessing the stress resistance"
Стоимость, руб.	Исходя из коммерческого предложения	Исходя из коммерческого предложения	Исходя из коммерческого предложения	Около 70 тыс. руб.
Габариты основного модуля, мм	150×100×35	170×100×40	322,5×214,8×15,9	206×160×55
Масса основного модуля, кг	0,3	0,5	отсутствует	1,2
Масса АПК, кг	2,8	3,0	2,5	1,2
Дополнительные технические средства	ПК	ПК	ПК	Не требуются
Стандарт пыле-влагозащиты	Не указан	Не указан	Не указан	IP44
Регистрируемые физиологические параметры	Вариабельность сердечного ритма (ВСР)	Кожно-гальваническая реакция (КГР)	Параметры голоса	КГР, электромиограмма (ЭМГ), частота сердечных сокращений (ЧСС)
Характер оценки	Недифференцированный	Недифференцированный	Недифференцированный	Дифференцированный

Как видно из таблицы 1, применение стационарных АПК в полевых условиях весьма затруднительно, где невозможно оборудовать место для постоянного проведения тестирования, отсутствует прямой доступ к электрической сети, отсутствует высококвалифицированный персонал.

Исходя из результатов сравнительного анализа, наиболее близких по характеристикам АПК, одним из преимуществ

портативной системы является получение информации от нескольких физиологических сигналов организма человека, интегральная оценка которых позволяет оценивать уровень СУ по показателям различных систем организма. Как правило, для оценки СУ используют следующую физиологическую информацию: ВСР, ЧСС, частота дыхания, электропроводность кожи, уровень кортизола в телесных жидкостях и

динамика изменения биоэлектрической активности мышц. Рассмотрим взаимо-

связь данных показателей с механизмом развития стресса (табл. 2).

Таблица 2. Связь физиологических параметров со стрессом

Table 2. The relationship of physiological parameters with stress

Физиологический параметр / The physiological parameter	Метод съема / The method of removal	Единицы измерения / Units of measurement	Связь со стрессом / Connection with stress
ВСП	Электрокардиограмма	мВ	Тест ВСП – количественный метод измерения активности вегетативной системы сердца для оценки её адаптивных возможностей (в том числе к стрессовым событиям)
ЧСС	Фотоплетизмограмма	мм рт. ст.	Мониторинг различия ЧСС между состояниями покоя и возбуждения служит для определения функциональности вегетативной нервной системы
Частота дыхания	Датчик дыхания	Циклы дыхания / мин	Стресс провоцирует выброс адреналина, гормона, который приводит к потере контроля над дыхательным центром, а также к увеличению частоты дыхания и глубины вдохов-выдохов
Электропроводность кожи	Датчик кожно-гальванической реакции	Ом	Электропроводность кожи изменяется вследствие стрессового потоотделения
Уровень кортизола	Электрохемилюминесцентный иммуноанализ слюны	нмоль/л	Кортизол продуцируется организмом в ответ на стрессовое событие
Динамика изменения биоэлектрической активности мышц	Электромиограмма	мВ	Стрессогенные события вызывают неосознанные мышечные сокращения, при которых изменяется характер биоэлектрической активности мышц

При выборе ключевых физиологических параметров, тесно связанных со стрессом, учитывались возможности средств их съёма, к которым предъявлялись такие требования, как: точность, эксплуатационное удобство, стоимость,

неинвазивность, наличие обратной связи в режиме реального времени. В таблице 3 представлена сравнительная характеристика методов съема физиологической информации.

Таблица 3. Сравнение методов съема физиологической информации**Table 3.** Comparison of methods for capturing physiological information

Метод съёма / The method of removal	Точность / Accuracy	Удобство эксплуата- ции / Ease of use	Стои- мость / Cost	Неинвазив- ность / Non- invasiveness	Наличие обратной связи / Availability of feedback
Электрокардиограмма	+	–	+	+	+
Фотоплетизмограмма	+	+	+	+	+
Датчик дыхания	–	–	+	+	+
Датчик кожно-гальва- нической реакции	+	+	+	+	+
Электрохемилюми- несцентный иммуно- анализ слюны	+	–	–	+	–
Электромиограмма	+	+	+	+	+

Использование электрокардиограммы (нелинейных параметров вариабельности сердечного ритма) является достаточно перспективным направлением оценки СУ, но, к сожалению, данный метод не подходит для быстрой оценки СУ в полевых условиях из-за требований к позе испытуемого и схемы размещения датчиков [15].

Поэтому, как видно из таблицы 3, наилучшей регистрируемой комбинацией физиологических параметров обследуемого является сочетание ЧСС [16], электропроводности кожи [17] и динамики изменения биоэлектрической активности мышц [18].

Рассмотрим концептуальную схему разработанной системы для оценки СУ военнослужащих (рис. 1).

Центральное звено в данной системе занимает блок управления и обработки сигналов (БУиО). БУиО осуществляет контроль за работой всей системы, а также выполняет анализ входных данных, приходящих с блока стимуляции (БС) и блока измерения (БИ).

Основной элемент БУиО – это модуль управления (МУ). МУ связан с БИ посредством аналоговой и цифровой передачи данных, реализация которых осуществляется с помощью интерфейсного модуля (ИМ). Взаимодействие пользователя с системой происходит с помощью модуля ввода / вывода (МВВ). Питание элементов всех блоков осуществляется с помощью автономного модуля питания.

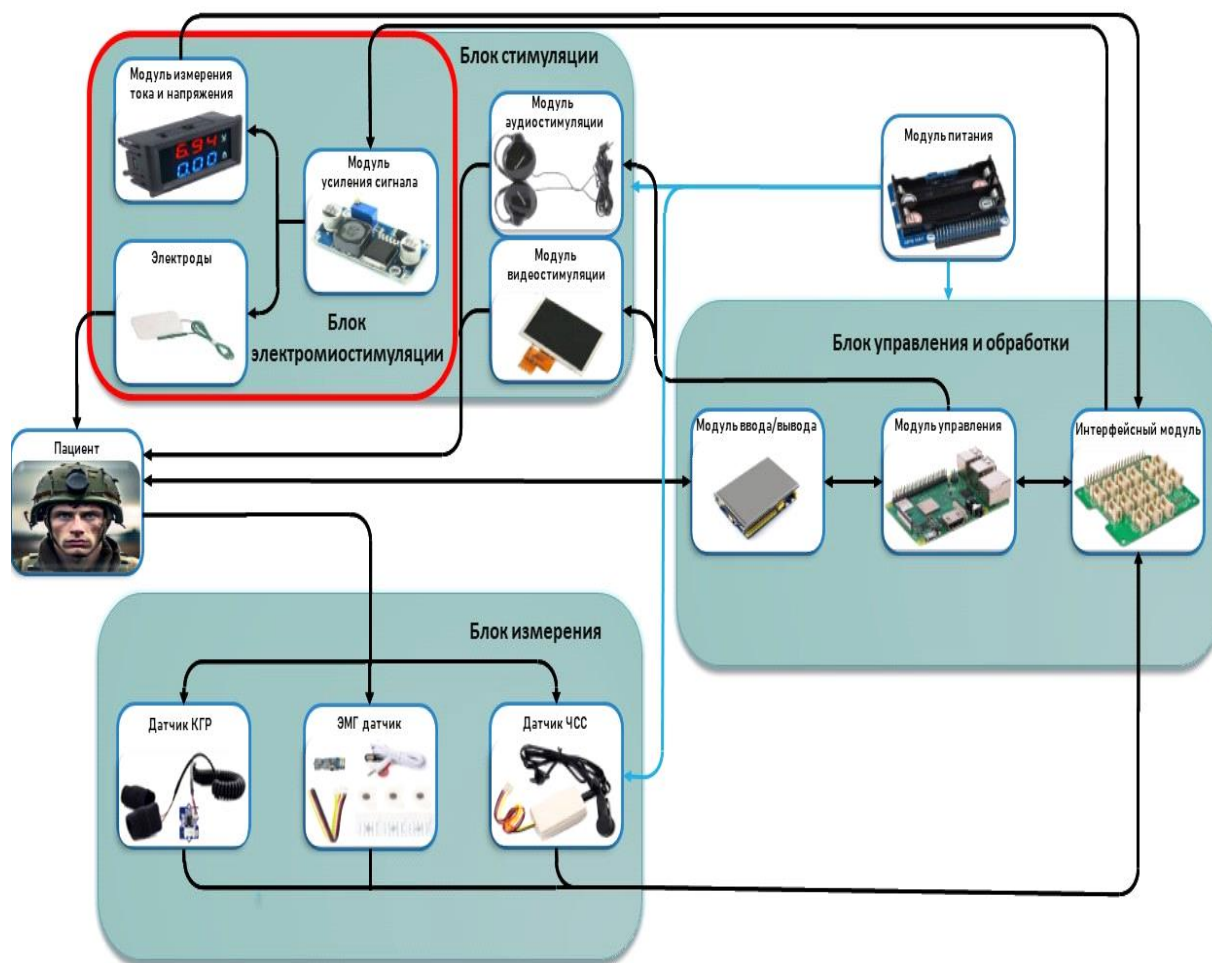


Рис. 1. Концептуальная схема портативной системы для оценки стрессоустойчивости военнослужащих

Fig. 1. A conceptual diagram of a portable system for assessing the stress resistance of military personnel

БИ осуществляет сбор информации о физиологических показателях испытуемого при помощи датчиков: ЧСС, ЭМГ и КГР. Кроме того, БИ выполняет оцифровку и передачу сигнала в ИМ по экранированным каналам связи для последующего преобразования в цифровой вид. Преобразованные данные передаются в МУ для фильтрации и анализа.

Блок стимуляции выполняет функцию стрессогенного события. Он воздействует на испытуемого посредством визуальных, звуковых и электрических

раздражителей. Генерация данных видов воздействия осуществляется при помощи модуля видеостимуляции, модуля аудиостимуляции и блока электростимуляции (БЭ).

БЭ необходим для передачи электрических сигналов с заданными параметрами на тело испытуемого с помощью накожных неинвазивных электродов. Усилитель постоянного тока, являющийся основным блоком БЭ, обеспечивает повышение напряжения сигнала, поступающего от МУ. Для управления

выходным сигналом усилителя БЭ используется обратная связь, реализуемая посредством использования модуля измерения тока и напряжения.

Таким образом, портативная система состоит из детерминированных модулей, работающих взаимосвязано с целью получения данных о физиологических параметрах организма испытуемого в течение воздействия на него череды стрессогенных событий.

Программная реализация модели для дифференцированной оценки стрессоустойчивости

Модель «предсказуемая – непредсказуемая угроза» (ПНУ) обеспечивает дифференцированную оценку СУ.

Предсказуемая угроза моделирует ситуацию, при которой человек может предсказать угрозу, а также оценить риск негативного события на его психическое и физическое состояния, основываясь на ранее полученном опыте или внешних раздражителях (реакция страха). Предсказуемая угроза активирует такие области мозга, как вентральная префронтальная кора и лимбические структуры. Вентральная префронтальная кора отвечает за планирование и прогноз реакции на события, происходящие вне текущего фокуса времени. Лимбические структуры связаны с формированием эмоций и поведенческих реакций.

Непредсказуемая угроза моделирует ситуацию, при которой человек не

способен предугадать надвигающуюся на него угрозу / негативное событие (реакция тревоги). Подобная угроза возбуждает область мозга, называемую миндалиной, отвечающую за реакцию на тревожные события. В процессе формирования ответной реакции на событие происходит возбуждение передней части островковой коры и дорсальной передней поясной извилины.

Основным различием острой и потенциальной угроз является задействование более примитивных областей мозга и реакций в ответ на непредсказуемый раздражитель [19].

Событием-раздражителем в разрабатываемой системе является электрическое воздействие. Модель предсказуемой и непредсказуемой угрозы реализуется посредством наличия аудиосигнала, предшествующего предсказуемой угрозе. При непредсказуемой угрозе аудиосигнал не подается.

Длительность фаз модели ПНУ составляет 45 секунд. Между фазами присутствует период релаксации длительностью 45 секунд, необходимый для возвращения нервной системы обследуемого к исходному (спокойному) состоянию.

Перед стресс-тестированием обследуемый проходит фазу адаптации, заключающуюся в подаче аудиосигнала, состоящего из равномерного немзыкального звукового фона в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц, с громкостью звука 103

Дб, длительностью 40 мс и мгновенным подъемом мощности.

Номинал напряжения в модуле электрической стимуляции подбирается исходя из физиологических параметров устойчивости нервной системы в индивидуальном порядке для каждого военнослужащего непосредственно перед прохождением стресс-тестирования. Для тестовой проверки реакции нервной системы на раздражитель в системе реализована возможность подачи пробного электрического заряда. Рекомендованным напряжением на выходе электростимулятора является значение до 50 В. Напряжение, используемое в ходе стресс-тестирования, подбирается исходя из значения электрического воздействия, приносящего болевые ощущения (на 10% ниже этого значения). В процессе исследования для электростимуляции используется ток с частотой 50 Гц с возможностью повышения этого значения до 250 Гц. Коэффициент заполнения также является регулируемым параметром со значением от 1 до 100% с шагом выбора в 1%.

В ходе тестирования информативными физиологическими параметрами являются:

- кожно-гальваническая реакция с пальцев рук, Ом;
- электромиограмма круговой мышцы глаза, мВ;
- частота сердечных сокращений, снимаемая с мочки уха, уд/мин.

Заключение об уровне СУ формируется автоматически на основании решающих правил, полученных эмпирическим путём.

Основными предъявляемыми требованиями к портативной системе являются: малогабаритность, эргономичность, низкое время развертывания системы, удобство эксплуатации и обслуживания, автономность работы.

Создание корпуса портативной системы для оценки СУ являлась 3D-печатать из ABS-пластика на основе технологии моделирования методом послойного наплавления.

Выбор метода изготовления обусловлен тем, что использование аддитивных технологий при производстве малых партий пластмассовых изделий является менее ресурсозатратным по сравнению с промышленными методами, такими как: литье под давлением, выдувное формование, ротационное формование и вакуумное литье [20].

Кроме того, использование 3D-печати даёт возможность производить изделия сложной формы без обращения к сторонним инструментальным приспособлениям.

Корпус прототипа портативной системы моделировался в программе «SOLIDWORKS 2018». Далее файл с трехмерной моделью загружался в программное обеспечение «IDEA Maker», где производилась генерация управляющих команд для 3D-принтера.

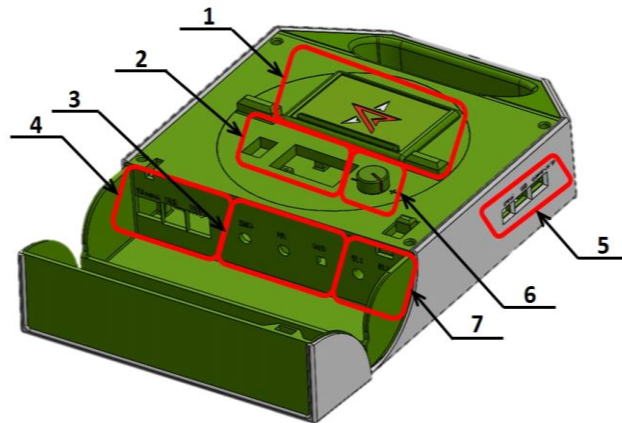


Рис. 2. 3D-модель корпуса портативной системы для оценки стрессоустойчивости военнослужащих: 1 – сенсорный дисплей; 2 – позиции выключателя клавишного и цифрового вольтметра-амперметра; 3 – позиции разъемов подключения средств съема ЭМГ, КГР, ЧСС; 4 – позиции разъемов подключения к мини-ПК; 5 – позиции дополнительных разъемов подключения к мини-ПК; 6 – регулятор напряжения электростимулятора; 7 – позиции разъемов подключения электродов электростимулятора

Fig. 2. 3D-model of a portable system casing for assessing the stress resistance of military personnel: 1 – touch screen; 2 – positions of the switch of the keyboard and digital voltmeter-ammeter; 3 – positions of connectors for connecting EMG, KGR, HR; 4 – positions of connectors for connecting to a mini-PC; 5 – positions of additional connectors for connecting to a mini-PC; 6 – voltage regulator of the electrostimulator; 7 – positions of connectors for connecting electrodes of the electrostimulator

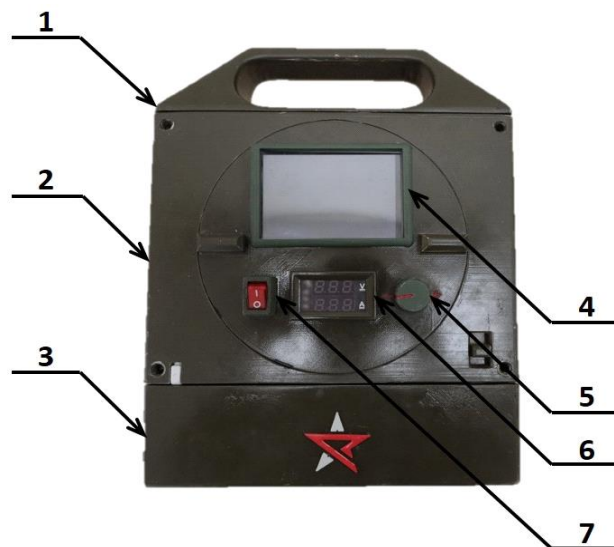


Рис. 3. Внешний вид прототипа корпуса портативной системы для оценки стрессоустойчивости военнослужащих: 1 – ручка транспортировочная; 2 – панель управления; 3 – отсек для хранения средств съема; 4 – сенсорный дисплей; 5 – регулятор напряжения электростимулятора; 6 – цифровой вольтметр-амперметр; 7 – выключатель клавишный

Fig. 3. The appearance of the prototype housing of a portable system for assessing the stress resistance of military personnel: 1 – a transportation handle; 2 – a control panel; 3 – a compartment for storing removal tools; 4 – a touch screen display; 5 – an electrical stimulator voltage regulator; 6 – a digital voltmeter-ammeter; 7 – a key switch

Для печати корпуса использовался принтер Raise3DPro2Plus (Китай), основанный на технологии печати FDM (англ. fused deposition modeling – моделирование методом послойного наплавления). В качестве материала для печати применялась нить из акрилонитрил-бутадиен-стирола (ABS) диаметром 1,75 мм (*Bestfilament*, Россия).

Условия печати: температура экструдера – 230°C; температура стола – 100°C; скорость печати – 60 мм/с; толщина слоя – 0,2 мм; заполнение 85%.

Постобработка выполнялась механическим методом – отделение деталей от подложек и поддерживающих конструкций, обрезка и шлифование мелких дефектов печати.

Основными преимуществами такого корпуса являются защищенность датчиков в специальном отсеке, сенсорный дисплей, удобная транспортировочная ручка.

Выводы

1. На сегодняшний день на рынке отсутствуют технические средства,

которые могут использоваться для дифференцированной оценки уровня стрессоустойчивости военнослужащих на всех этапах мониторинга профессиональной надежности.

2. Концептуальная схема портативной системы для дифференцированной оценки СУ военнослужащих может послужить основой для разработки технических средств для нужд ВС РФ.

3. Разработанный прототип портативной системы для дифференцированной оценки СУ военнослужащих демонстрирует осуществимость и практическую реализуемость разрабатываемой системы.

4. Внедрение в практическую деятельность портативной системы для дифференцированной оценки уровня стрессоустойчивости и аналогичных средств позволит осуществлять динамическую оценку важнейший ПВК военнослужащих на всех этапах мониторинга профессиональной надежности, что позволит своевременно принять решение и снизить число критических ошибок при исполнении должностных обязанностей.

Список литературы

1. Дорофеев И. И. Профессионально важные качества военнослужащих в различных группах специальностей // Известия Российской военно-медицинской академии. 2020. № S3–4. С. 60–67.
2. Современные подходы к оценке стрессоустойчивости у военнослужащих / Е. В. Крюков, Е. В. Ивченко, В. К. Шамрей, А. А. Марченко, А. В. Лобачев,

О. С. Виноградова, Е. А. Журбин, Е. С. Щелканова // Военно-медицинский журнал. 2023. Т. 344, № 7. С. 4–15. https://doi.org/10.52424/00269050_2023_344_7_4

3. Stress Resilience Assessment Based on Physiological Features in Selection of Air Traffic Controllers / K. Cosic, M. Šarlija, V. Ivkovic, Q. Zhang, G. Strangman, S. Popovic // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 41989–42005. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2907479>

4. Евдокимов В. И., Шамрей В. К., Плужник М. С. Развитие направлений научных исследований по боевому стрессу в отечественных статьях с использованием программы VOSviewer (2005–2021 гг.) // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2023. № 2. С. 99–116. <https://doi.org/10.25016/2541-7487-2023-0-2-99-116>

5. Концепция стрессоустойчивости в контексте мониторинга психического здоровья военнослужащих – современный взгляд на проблему / А. А. Марченко, А. В. Лобачев, О. С. Виноградова, Д. В. Моисеев // Психическое здоровье военнослужащих и специалистов экстремальных видов профессиональной деятельности: материалы Всероссийской научно-практической конференции, г. Санкт-Петербург, 28 октября 2022 года / под ред. В. К. Шамрея. СПб.: Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова, 2022. С. 23–28.

6. Психофизиологические маркеры стрессоустойчивости у военнослужащих моторно-волевого класса воинских должностей / А. А. Марченко, А. В. Лобачев, В. Д. Пронин, В. Н. Ищук, Е. А. Чернявский, О. С. Виноградова // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Биотехнические системы и технологии»: сборник статей III Всероссийской научно-технической конференции, г. Анапа, 27–28 мая 2021 года. Анапа: Военный инновационный технополис «ЭРА», 2021. С. 169–174.

7. Neurocognitive Function and Suicidal Behavior in U.S. Army Soldiers / J. A. Naifeh, M. K. Nock, R. J. Ursano [et al.] // Suicide and Life-Threatening behavior. 2017. N 47(5). P. 589–602. <https://doi.org/10.1111/sltb.12307>

8. Cognitive function, stress hormones, heart rate and nutritional status during simulated captivity in military survival training / H. R. Lieberman, E. K. Farina, J. Caldwell [et al.] // Physiology & Behavior. 2016. N 165. P. 86–97. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2016.06.037>

9. Training Success for U.S. Air Force Special Operations and Combat Support Specialties: An Analysis of Recruiting, Screening, and Development Processes / M. C. Lytell, S. Robson, D. Schulker [et al.]. Santa Monica, Cal.: RAND Corporation, 2018. P. 29–31. <https://doi.org/10.7249/RR2002>

10. Сахаров А. Ф., Сабыбин А. В. Влияние экстремальных ситуаций на психику и поведение военнослужащих в условиях воинской деятельности // Научные революции:

сущность и роль в развитии науки и техники: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. Уфа: Агентство международных исследований, 2018. С. 35–42.

11. Schmitz A., Grillon C. The NPU-threat test: assessing fear and anxiety in humans using threat of predictable and unpredictable aversive events // *Nature Protocols*. 2012. N 7(3). P. 527–532. <https://doi.org/10.1038/nprot.2012.001>

12. Особенности формирования нервной системы кадетов в период адаптации к образовательному процессу / Г. А. Яманова, В. Г. Сердюков, А. А. Антонова, Л. А. Милоченкова // *Вестник Волгоградского государственного медицинского университета*. 2020. № 1(73). С. 137–140.

13. Повышение эффективности системы психофизиологической подготовки высококвалифицированных боксеров / Э. Ш. Шаяхметова, Э. Р. Хакимов, А. Ф. Гайнуллина, А. Л. Линтварев // *Теория и практика физической культуры*. 2017. № 12. С. 56–58.

14. An automatic speech analytics program for digital assessment of stress burden and psychosocial health / A. M. Y. Chu, B. S. Y. Lam, J. T. Y. Tsang [et al.] // *npj Mental Health Research*. 2023. N 2. P. 15.

15. Использование нелинейных параметров вариабельности сердечного ритма для выявления стресса / Д. А. Димитриев, Е. В. Саперова, А. Д. Димитриев, Э. Р. Салимов // *Журнал медико-биологических исследований*. 2021. № 3. С. 265–274. <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z064>

16. A wearable heart rate measurement device for children with autism spectrum disorder / F. Fioriello, A. Maugeri, L. D’Alvia [et al.] // *Sci. Rep.* 2020. N 10(1). P. 18659. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75768-1>

17. Chen J., Abbod M., Shieh J.-S. Pain and Stress Detection Using Wearable Sensors and Devices – A Review // *Sensors*. 2021. N 21. P. 1030. <https://doi.org/10.3390/s21041030>

18. Jegan R., Nimi W. S. On the development of low power wearable devices for assessment of physiological vital parameters: a systematic review // *J. Public Health*. 2024. Vol. 32. P. 1093–1108. <https://doi.org/10.1007/s10389-023-01893-6>

19. Radoman M., Phan K. L., Gorka S. Neural correlates of predictable and unpredictable threat in internalizing psychopathology // *Neuroscience Letters*. 2019. N 701. P. 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2019.02.031>

20. Шимохин А. В. Экономическое обоснование внедрения аддитивной технологии в технологические процессы производства продукции предприятия // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент*. 2019. № 4. С. 13–19. <https://doi.org/10.17586/2310-1172-2019-12-4-13-19>

References

1. Dorofeev I.I. Professionally important qualities of military personnel in various groups of specialties. *Izvestiya Rossiiskoi voenno-meditsinskoi akademii = Proceedings of the Russian Military Medical Academy*. 2020;S3–4:60–67. (In Russ.)
2. Kryukov E.V., Ivchenko E.V., Shamrey V.K., Marchenko A.A., Lobachev A.V., Vinogradova O.S., Zhurbin E.A., Shchelkanova E.S. Modern approaches to assessing stress resistance in military personnel. *Voenno-meditsinskii zhurnal = Military Medical Journal*. 2023;344(7):4–15. (In Russ.) https://doi.org/10.52424/00269050_2023_344_7_4
3. Cosic K., Šarlija M., Ivkovic V., Zhang Q., Strangman G., Popovic S. Stress Resilience Assessment Based on Physiological Features in Selection of Air Traffic Controllers. *IEEE Access*. 2019;7:41989–42005. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2907479>
4. Evdokimov V.I., Shamrey V.K., Pluzhnik M.S. Development of scientific research directions on combat stress in domestic articles using the VOSviewer program (2005–2021). *Mediko-biologicheskie i sotsial'no-psikhologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh situatsiyakh = Biomedical and Socio-Psychological Safety Problems in Emergency Situations*. 2023;(2):99–116. (In Russ.) <https://doi.org/10.25016/2541-7487-2023-0-2-99-116>
5. Marchenko A.A., Lobachev A.V., Vinogradova O.S., Moiseev D.V. The concept of stress tolerance in the context of monitoring the mental health of military personnel – a modern view of the problem. In: Shamrey V.K. (ed.) *Mental health of military personnel and specialists in extreme professional activities: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, 28 October 2022, St. Petersburg*. Saint Petersburg: Voenno-meditsinskaya akademiya imeni S. M. Kirova, 2022. P. 23–28. (In Russ.)
6. Marchenko A.A., Lobachev A.V., Pronin V.D., Ishchuk V.N., Chernyavsky E.A., Vinogradova O.S. Psychophysiological markers of stress tolerance in military personnel of the motor-volitional class of military positions. In: *Sostoyanie i perspektivy razvitiya sovremennoi nauki po napravleniyu «Biotehnicheskie sistemy i tekhnologii»: sbornik statei III Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, g. Anapa, 27–28 maya 2021 goda = The state and prospects of the development of modern science in the field of "Biotechnical systems and technologies": Collection of articles of the III All-Russian Scientific and Technical Conference, 27–28 May 2021, Anapa*. Anapa: Voennyi innovatsionnyi tekhnopolis "ERA"; 2021. P. 169–174. (In Russ.)
7. Naifeh J.A., Nock M.K., Ursano R.J., et al. Neurocognitive Function and Suicidal Behavior in U.S. Army Soldiers. *Suicide and Life-Threatening behavior*. 2017;(47):589–602. <https://doi.org/10.1111/sltb.12307>

8. Lieberman H.R., Farina E.K., Cald-well J., et al. Cognitive function, stress hormones, heart rate and nutritional status during simulated captivity in military survival training. *Physiology & Behavior*. 2016;(165):86–97. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2016.06.037>
9. Lytell M.C., Robson S., Schulker D., et al. Training Success for U.S. Air Force Special Operations and Combat Support Specialties: An Analysis of Recruiting, Screening, and Development Processes. Santa Monika, Cal.: RAND Corporation; 2018. P. 29–31. <https://doi.org/10.7249/RR2002>
10. Sakharov A.F., Sabybin A.V. The influence of extreme situations on the psyche and behavior of military personnel in conditions of military activity. In: *Nauchnye revolyutsii: sushchnost' i rol' v razvitii nauki i tekhniki: sbornik statei po itogam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Scientific revolutions: the essence and role in the development of science and technology: A collection of articles based on the results of the International Scientific and Practical Conference*. Ufa: Agentstvo mezhdunarodnykh issledovaniy; 2018. P. 35–42. (In Russ.)
11. Schmitz A., Grillon C. The NPU-threat test: assessing fear and anxiety in humans using threat of predictable and unpredictable aversive events. *Nature Protocols*. 2012;(7):527–532. <https://doi.org/10.1038/nprot.2012.001>
12. Yamanova G.A., Serdyukov V.G., Antonova A.A., Milyuchenkova L.A. Features of the formation of the nervous system of cadets during the period of adaptation to the educational process. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta = Bulletin of the Volgograd State Medical University*. 2020;(1):137–140. (In Russ.)
13. Shayakhmetova E.Sh., Khakimov E.R., Gayullina A.F., Lintvarev A.L. Improving the effectiveness of the system of psychophysiological training of highly qualified boxers. *Theory and Practice of Physical Culture*. 2017;(12):56–58. (In Russ.)
14. Chu A. M. Y., Lam B. S. Y., Tsang J. T. Y., et al. An automatic speech analytics program for digital assessment of stress burden and psychosocial health. *npj Mental Health Research*. 2023;(2):15.
15. Dimitriev D.A., Saperova E.V., Dimitriev A.D., Salimov E.R. Using nonlinear parameters of heart rate variability for Stress detection. *Zhurnal mediko-biologicheskikh issledovaniy = Journal of Biomedical Research*. 2021;(3):265–274. (In Russ.) <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z064>
16. Fioriello F., Maugeri A., D'Alvia L., et al. A wearable heart rate measurement device for children with autism spectrum disorder. *Sci. Rep.* 2020;(10):18659. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75768-1>
17. Chen J., Abbod M., Shieh J.-S. Pain and Stress Detection Using Wearable Sen-sors and Devices – A Review. *Sensors*. 2021;(21):1030. <https://doi.org/10.3390/s21041030>

18. Jegan R., Nimi W.S. On the development of low power wearable devices for assessment of physiological vital parameters: a systematic review. *J. Public Health*. 2024;32:1093–1108. <https://doi.org/10.1007/s10389-023-01893-6>
19. Radoman M., Phan K.L., Gorka S. Neural correlates of predictable and unpredictable threat in internalizing psychopathology. *Neuroscience Letters*. 2019;701:193–201. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2019.02.031>
20. Shimokhin A.V. Economic justification for the introduction of additive technology into the technological processes of the enterprise's production. *Scientific Journal of the National Research University of ITMO. Series: Economics and Environmental Management*. 2019;(4):13–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.17586/2310-1172-2019-12-4-13-19>

Информация об авторах / Information about the Authors

Щелканова Елена Сергеевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела медико-биологических исследований, Военный инновационный технополис «ЭРА», г. Анапа, Российская Федерация, e-mail: era_otd6@mil.ru, ORCID: 0000-0003-0672-8820

Elena S. Shchelkanova, Candidate of Sciences (Biology), Senior Researcher of the Research Department of Medical and Biological Research, Military Innovative Technopolis "ERA", Anapa, Russian Federation, e-mail: era_otd6@mil.ru, ORCID: 0000-0003-0672-8820

Журбин Евгений Александрович, кандидат медицинских наук, начальник научно-исследовательского отдела медико-биологических исследований, Военный инновационный технополис «ЭРА», г. Анапа, Российская Федерация, e-mail: era_otd6@mil.ru, ORCID: 0000-0002-0867-3838

Evgeniy A. Zhurbin, Candidate of Sciences (Medical), Head of the Research Department of Medical and Biological Research, Military Innovative Technopolis "ERA", Anapa, Russian Federation, e-mail: era_otd6@mil.ru, ORCID: 0000-0002-0867-3838

Маркин Илья Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела медико-биологических исследований, Военный инновационный технополис «ЭРА», г. Анапа, Российская Федерация, e-mail: era_otd6@mil.ru, ORCID: 0009-0006-2874-4177

Ilya V. Markin, Candidate of Sciences (Engineering), Senior Researcher of the Research Department of Medical and Biological Research, Military Innovative Technopolis "ERA", Anapa, Russian Federation, e-mail: era_otd6@mil.ru, ORCID: 0009-0006-2874-4177

Письменный Григорий Михайлович,
старший оператор роты (научной)
научно-исследовательского отдела
медико-биологических исследований,
Военный инновационный технополис «ЭРА»,
г. Анапа, Российская Федерация,
e-mail: era_otd6@mil.ru

Grigory M. Pismennyi, Senior Operator
of the Company (Scientific) of the Research
Department of Medical and Biological Research,
Military Innovative Technopolis "ERA",
Anapa, Russian Federation,
e-mail: era_otd6@mil.ru

Назарова Марина Ризаевна, младший
научный сотрудник научно-исследовательского
отдела медико-биологических исследований,
Военный инновационный технополис «ЭРА»,
г. Анапа, Российская Федерация,
e-mail: era_otd6@mil.ru,
ORCID: 0009-0000-7368-9222

Marina R. Nazarova, Research Assistant
of the Research Department of Medical
and Biological Research, Military Innovative
Technopolis "ERA", Anapa, Russian Federation,
e-mail: era_otd6@mil.ru,
ORCID: 0009-0000-7368-9222

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-108-118>



УДК 005; 519.7; 303.732

Методы анализа телематических данных для систем поддержки принятия решений оптимального беспилотного управления автомобилями

Р. А. Ходукин¹ ✉, Р. А. Томакова¹, А. В. Малышев¹

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

✉ e-mail: romakhodukin@gmail.com

Резюме

Цель исследования – анализ современных решений, ориентированных на поддержку принятия решений по оптимальному управлению автомобилем в рамках концепции Connected Car, а также систематизация основных методов применения телематических данных и архитектуры подобных систем.

Методы. Исследование основано на анализе отечественных и зарубежных публикаций, патентов и практических реализаций в сфере Connected Car, а также на примерах внедрения телематических платформ в автомобильную промышленность. Рассмотрены классические статистические методы, алгоритмы машинного обучения и инструменты потоковой обработки больших данных. Особое внимание уделено масштабируемости, стандартизации и качеству телематической информации.

Результаты. Установлено, что большинство современных систем опираются на базовые методы статистики и машинного обучения (классификация, кластеризация, регрессионные модели) для анализа больших массивов данных о движении автомобиля. Однако единые подходы к интеграции этих методов в комплексную архитектуру систем поддержки принятия решений пока не сформировались. Наибольшую эффективность демонстрируют гибридные подходы, совмещающие методы статистики, ML-алгоритмы и Big Data-технологии. Их широкому внедрению препятствуют отсутствие единых стандартов обмена телематическими данными, трудности надёжного хранения данных и необходимость фильтрации шума и пропусков. На основании обзора определены преимущества и недостатки различных методов, а также сформулированы требования к архитектуре СППР для Connected Car.

Заключение. Проведённый обзор подтверждает высокую востребованность гибких, масштабируемых решений, способных обрабатывать телематические данные в режиме реального времени и учитывать индивидуальные особенности вождения. Дальнейшее развитие подобных систем тесно связано с унификацией форматов телематической информации, повышением уровня безопасности (как в части защиты данных, так и в сфере дорожного движения), а также расширением спектра анализируемых источников (дорожная инфраструктура, погодные условия, экосистемы умных городов и др.) для повышения точности рекомендаций и оптимизации управления автомобилем.

Ключевые слова: Connected Car; система поддержки принятия решений; оптимальное управление; телематические данные; телематика.

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

Для цитирования: Ходукин Р. А., Томакова Р. А., Малышев А. В. Методы анализа телематических данных для систем поддержки принятия решений оптимального беспилотного управления автомобилями // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 2. С. 108–118. [https://doi.org/ 10.21869/2223-1536-2025-15-2-108-118](https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-108-118)

Поступила в редакцию 07.04.2025

Подписана в печать 04.05.2025

Опубликована 30.06.2025

Methods of telematics data analysis for decision support systems for optimal unmanned vehicle control

Roman A. Khodukin¹✉, Rimma A. Tomakova¹, Alexander V. Malyshev¹

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

✉ e-mail: romakhodukin@gmail.com

Abstract

The purpose of the research is purpose of the study. The analysis of modern solutions aimed at supporting decision-making on optimal driving within the framework of the Connected Car concept, as well as systematize the main methods of using telematics data and architecture of similar systems.

Methods. Methods. The study is based on an analysis of domestic and foreign publications, patents and practical implementations in the field of Connected Cars, as well as examples of the introduction of telematics platforms in the automotive industry. Classical statistical methods, machine learning algorithms, and big data streaming tools are considered. Special attention is paid to scalability, standardization and quality of telematics information.

Results. It has been established that most modern systems rely on basic statistical and machine learning methods (classification, clustering, regression models) to analyze large amounts of data on vehicle movement. However, unified approaches to the integration of these methods into the integrated architecture of decision support systems have not yet been formed. Hybrid approaches combining statistical methods, ML algorithms, and Big Data technologies demonstrate the greatest effectiveness. Their widespread adoption is hampered by the lack of uniform standards for telematics data exchange, the difficulties of reliable data storage, and the need to filter noise and omissions. Based on the review, the advantages and disadvantages of various methods are identified, as well as the requirements for the architecture of the DSS for the Connected Car are formulated.

Conclusion. The review confirms the high demand for flexible, scalable solutions capable of processing telematics data in real time and taking into account individual driving characteristics. The further development of such systems is closely related to the unification of telematics information formats, increased security (both in terms of data protection and in the field of traffic), as well as expanding the range of analyzed sources (road infrastructure, weather conditions, smart city ecosystems, etc.) to improve the accuracy of recommendations and optimize driving.

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

Keywords. Connected Car; decision support system; optimal management; telematics data; telematics.

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

For citation: Khodukin R.A., Tomakova R.A. Malyshev A.V. Methods of telematics data analysis for decision support systems for optimal unmanned vehicle control. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2025;15(2):108–118. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-108-118>

Received 07.04.2025

Accepted 04.05.2025

Published 30.06.2025

Введение

Современные автомобили генерируют огромные объёмы телематических данных, содержащих информацию о работе узлов и агрегатов, дорожных условиях, пробках и прочих параметрах [1]. Эти данные формируются за счёт работы бортовых систем, сенсоров, GPS-устройств и внешних источников [2]. В их число входят показатели скорости, расхода топлива, работы двигателя, а также характеристики поведения водителя (ускорение, торможение и т. д.). Телематика находит применение в повышении безопасности движения [3], улучшении пользовательского опыта, оптимизации расходов на обслуживание и планировании транспортных потоков [4]. Однако быстрый рост объёмов и разнообразие форматов телематической информации создают трудности при их эффективной обработке и анализе.

В связи с этим особую значимость приобретает применение методов анализа больших данных (Big Data) для решения задач профилактического обслуживания (predictive maintenance), поддержки водителя и управления автопарками [5]. Системы поддержки принятия решений (DSS) предназначены для оказания помощи водителям, операторам

транспортных парков и сервисным компаниям в обоснованном принятии решений на основе анализа больших объёмов данных. Для достижения этой цели необходимо использовать методы, обеспечивающие обработку информации в реальном времени, выявление аномалий и прогнозирование неисправностей [6].

Целью данной статьи является аналитический обзор современных подходов к обработке телематических данных, выявление общих тенденций и ограничений, а также определение направлений дальнейшего развития данной области.

Материалы и методы

При разработке систем поддержки принятия решений (DSS) для автомобилей применяются разнообразные методы анализа данных [7]. Для систематизации целесообразно выделить следующие критерии классификации:

1. По типам алгоритмов:

– статистические методы. К ним относятся регрессионные модели, метод главных компонент и т. д.;

– методы машинного обучения.

Чаще всего используются методы случайного леса, решающие деревья, искусственные нейронные сети, методы классификации и кластеризации различных объектов [8];

– гибридные подходы. Основываются на комбинации статистических методов и алгоритмов машинного обучения, включая ансамбли методов.

2. По характеру используемых данных и их обработке:

– потоковые методы для анализа данных в реальном времени (streaming analytics);

– методы пакетной обработки для исторических данных (batch processing).

3. По масштабу инфраструктуры:

– локальные решения (обработка данных непосредственно в автомобиле, edge computing, сенсоры смартфона) [9];

– облачные (централизованные системы сбора и анализа больших объёмов данных).

4. По целям анализа:

– диагностика и прогнозирование неисправностей (predictive maintenance);

– оптимизация вождения (анализ расхода топлива, оценка стиля вождения);

– адаптивные системы безопасности (ADAS, V2X-коммуникации) [10];

– анализ транспортных потоков (управление трафиком, концепции смарт-город).

Сравнительный анализ существующих методик:

1. Статистические подходы. К традиционным методам относятся регрессионные модели (линейная и логистическая регрессия), модели временных рядов (ARIMA) и анализ главных

компонент (РСА). Преимуществами этих методов являются простота реализации, высокая интерпретируемость и невысокие вычислительные затраты [11]. Однако с увеличением числа параметров и усложнением взаимосвязей между ними эффективность статистических моделей может снижаться.

2. Методы машинного обучения. Современные DSS активно используют алгоритмы машинного обучения, включая глубокие нейронные сети (deep learning), для выявления сложных закономерностей в больших массивах телематических данных [12]. Эти методы позволяют предсказывать поломки, оценивать стиль вождения и выявлять аномалии. Основными недостатками являются высокая вычислительная нагрузка и необходимость в большом объёме размеченных данных.

3. Потоковая обработка vs. пакетная. Платформы потоковой обработки (например, Apache Kafka, Apache Flink, Spark Streaming) обеспечивают оперативное реагирование на изменения в данных, что особенно критично для систем безопасности (ADAS) [13]. Пакетная обработка, напротив, позволяет анализировать исторические данные для выявления долгосрочных трендов, оценки эффективности стратегий обслуживания и обновления моделей. В таблице 1 приведено сравнение основных методик анализа телематических данных.

Таблица 1. Сравнение основных методик анализа телематических данных**Table 1.** Comparison of the main methods of telematics data analysis

Метод	Точность	Сложность	Realtime	Интерпретируемость
Статистические модели	Средняя	Низкая	Средняя	Высокая
ML (решающие деревья)	Средняя / Высокая	Средняя	Средняя	Средняя
ML (глубокие нейронные сети)	Высокая	Высокая	Средняя / Низкая	Низкая
Потоковая обработка	Зависит от алгоритмов	Средняя	Высокая	Средняя
Пакетная обработка	Зависит от алгоритмов	Средняя / Высокая	Низкая	Средняя

Результаты и их обсуждение

В результате проведённого обзора современных подходов к обработке телематических данных для систем поддержки принятия решений (DSS) в автомобильной отрасли можно выделить несколько ключевых проблемных зон, а также перспективные направления развития, способные повысить эффективность и надёжность таких систем [14].

1. Недостаток размеченных данных. Эффективное обучение алгоритмов требует больших объёмов качественных размеченных данных, отражающих неисправности, дорожные инциденты и особенности поведения водителя [15]. Однако процесс сбора и систематизации таких данных выполняется лицом, принимающим решения, и зачастую выполняется медленно, что приводит к снижению точности предиктивных моделей.

2. Высокие требования к вычислительным ресурсам. Обработка огромных

потоков телематической информации в реальном времени предъявляет высокие требования к вычислительной инфраструктуре. Особенно актуально это для систем, реализуемых «на борту» транспортных средств, где ограниченность аппаратных ресурсов может снижать скорость и качество анализа [16].

3. Интеграция разнородных источников. Телематическая информация имеет разную структуру, так как поступает из различных источников, таких как: CAN-шина, GPS, камеры, радары и др. Отсутствие единых стандартов затрудняет их объединение и последующую обработку [17].

4. Обеспечение безопасности и конфиденциальности. Передача, хранение и анализ телематических данных требуют соблюдения строгих стандартов информационной безопасности и защиты персональных данных, что добавляет сложности при разработке DSS.

5. Низкая объяснимость сложных моделей. Применение глубоких нейронных сетей зачастую приводит к эффекту «черного ящика», когда интерпретация результатов затруднена. Это особенно критично в системах, где требуется прозрачное объяснение принятых решений [18].

Направления развития и перспективы:

1. Активное и полуактивное обучение. Использование методов *active* и *semi-supervised learning* позволит ускорить процесс формирования обучающих выборок. Частичная разметка с участием экспертов может существенно повысить качество и объём данных, необходимых для обучения алгоритмов.

2. Развитие Edge Computing. Переход к распределённым вычислениям непосредственно в транспортном средстве (*edge computing*) позволит снизить задержки при обработке данных и уменьшить зависимость от облачных инфраструктур. Это особенно важно для задач, требующих оперативного принятия решений, таких как системы ADAS.

3. Внедрение Explainable AI (XAI). Разработка и интеграция методов объяснимого искусственного интеллекта (XAI) обеспечит прозрачность работы сложных моделей. Визуализация результатов, генерация причинно-следственных связей и другие подходы XAI помогут повысить доверие пользователей и способствуют более точной интерпретации алгоритмических решений [19].

4. Стандартизация данных. Создание единого стандарта представления телематических данных, согласованного между производителями и научным сообществом, облегчит интеграцию разнородных источников и позволит проводить более корректный сравнительный анализ различных методов обработки.

5. Применение онтологий и семантических технологий. Использование семантических моделей и онтологий для объединения данных о транспортном средстве, дорожных условиях, погоде и других факторах позволит создать единую базу знаний, способствующую более точным контекстным выводам в системах DSS [20].

В совокупности результаты анализа свидетельствуют о высоком потенциале современных методов обработки телематических данных для повышения эффективности DSS, несмотря на существующие ограничения. Для преодоления этих барьеров предлагается использовать применение гибридных подходов, которые объединяют преимущества традиционных статистических методов и современных алгоритмов машинного обучения, а также активное внедрение технологий XAI и *edge computing* [11]. Реализация данных направлений позволит существенно повысить надёжность, интерпретируемость и оперативность принимаемых решений, что в конечном итоге будет способствовать повышению безопасности дорожного движения и оптимизации управления автопарками [9].

Выводы

В данной работе рассмотрены основные методы анализа телематических данных, применяемые в системах поддержки принятия решений в автомобильной отрасли. Предложенная классификация, основанная на типах алгоритмов, характере обработки данных, масштабах инфраструктуры и целях анализа, позволяет систематизировать существующие подходы. Сравнительный анализ выявил преимущества и ограничения статистических методов и

алгоритмов машинного обучения. Основное внимание уделено проблемам недостатка размеченных данных, высоким требованиям к вычислительным ресурсам, сложности интеграции разнородных источников, а также вопросам безопасности и объяснимости моделей. Выводы подчёркивают необходимость развития гибридных подходов, внедрения технологий edge computing и ХАИ, а также стандартизации данных, что может служить основой для дальнейших исследований и разработки практических решений в области connected car.

Список литературы

1. Телематика на транспорте / Ш. К. Хакимов, Р. Г. Саматов, С. С. Ражапова, Д. А. Абдураззакова // Экономика и социум. 2022. № 10(101), ч. 1. С. 671–677.
2. Дороненкова А. А., Широков И. Б. Основы построения и перспективы развития технологии Connected Car // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: сборник научных трудов / под ред. И. Л. Афолина. М.: РНТОРЭС им. А. С. Попова, 2022. № 5. С. 200.
3. Guillen M., Nielsen J. P., Ayuso M. The use of telematics devices to improve automobile insurance rates // Risk Analysis. 2019. N 39. P. 662–672 <https://doi.org/10.1111/risa.13172>
4. Кушелев И. Ю. Внедрение инновационных информационных технологий на страховом рынке в России: телематика в автостраховании // Путеводитель предпринимателя. 2023. Т. 16, № 2. С. 110–119. <https://doi.org/10.24182/2073-9885-2023-16-2-110-119>
5. A Distributed Rough Set Theory Algorithm based on Locality Sensitive Hashing for an Efficient Big Data Pre-processing / Zaineb Chelly Dagdia, Christine Zarges, Gaël Beck, Hanene Azzag, Mustapha Lebbah // IEEE International Conference on Big Data (Big Data). Seattle, WA: IEEE, 2018. P. 4266–4273. <https://doi.org/10.1109/BigData.2018.8622024>
6. Unlocking the value from car data: a taxonomy and archetypes of connected car business models / F. Sterk, A. Stocker, D. Heinz, Ch. Weinhardt // Electronic Markets. 2024. Vol. 34. P. 1. <https://doi.org/10.1007/s12525-024-00692-5>
7. Рынок Connected Cars: Текущее состояние и основные перспективы развития / А. А. Розов, А. А. Степанова, М. В. Комарова, Е. В. Солодкова // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2021. № 6, ч. 1. С. 90–95. <https://doi.org/10.17513/vaael.1733>

8. Постолиит А. В. Перспективы применения искусственного интеллекта и компьютерного зрения в транспортных системах и подключенных автомобилях // Мир транспорта. Российский университет транспорта (МИИТ). 2021. Т. 19, № 1(92). С. 74–90.

9. Лашков И. Б. Подход к распознаванию стиля вождения водителя транспортного средства на основе использования сенсоров смартфона // Информационно-управляющие системы. 2018. № 5. С. 2–12. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2018-5-2-12>

10. Mandala V., Surabhi S. N. R. D. Integration of AI-driven predictive analytics into connected car platforms // International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology. 2024. Vol. 7, is. 12. P. 84–93. <https://doi.org/10.17148/iarjset.2020.71216>

11. Qian Li, Pan Chen, Rui Wang. Edge Computing for Intelligent Transportation System: A Review // Cyberspace Data and Intelligence, and Cyber-Living, Syndrome, and Health: International 2019 Cyberspace Congress, CyberDI and CyberLife, Beijing, China. Singapore: Springer, 2019, Pt. 2. P. 130–137. http://doi.org/10.1007/978-981-15-1925-3_10

12. Parmar Y., Natarajan S., Sobha G. DeepRange: Deep-learning based object detection and ranging in autonomous driving // IET Intelligent Transport Systems. 2019. Vol. 13, N 8. P. 1256–1264.

13. Подключенные автомобили в интеллектуальных транспортных системах умных городов / С. А. Ляпин, Д. В. Капский, Ю. Н. Ризаева, Д. А. Кадасев // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте: сборник статей Международной научно-практической конференции. Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2022. С. 7–14.

14. Окольнішнікова І. Ю., Келлер А. В., Конкс В. Я. Маркетинговий аналіз мирового рынка телематических транспортных и информационных систем управления // Вестник университета. 2022. № 12. С. 46–54.

15. Пермовский А. А., Ускова А. А. Оценка эффективности внедрения технологии Connected Car // International Journal of Advanced Studies. 2021. Т. 11, № 3. С. 68–75. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2021-11-3-68-75>

16. Пермовский А. А., Ускова А. А. Оценка эффективности внедрения технологии Connected car // International Journal of Advanced Studies. 2021. Т. 11, № 3. С. 68–75. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2021-11-3-68-75>

17. Постолиит А. В. Перспективные сервисы для подключенных автомобилей на базе нейросетевых технологий и систем компьютерного зрения // Новости навигации. 2021. № 1. С. 28–34.

18. Sanjay P. Pande, Sarika Khandelwal. An Improved Deep Network and Handcrafted Feature-Based Scene Classification Convolutional Model for Self-Driving Cars // Communications on Applied Nonlinear Analysis. 2024. Vol. 31, N 2s. P. 593–605.

19. Hassan M., Hussain A., Anwar S. Challenges and Solutions in Integrating AI-Driven Predictive Analytics into Connected Car Platforms // IEEE International Conference on

Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD). Chengdu, China: IEEE, 2018. P. 153–157. <https://doi.org/10.1109/ICAIBD.2018.8372276>

20. Громов Н. Д., Сапрыкин Д. А. Применение технологий интернета вещей в беспилотных автомобилях и дальнейшие пути развития // *Моя профессиональная карьера*. 2021. Т. 1, № 24. С. 109–115.

References

1. Khakimov Sh.K., Samatov R.G., Razhapova S.S., Abdurazzakova D.A. Telematics in transport. *Ekonomika i sotsium = Economics and Society*. 2022;(10):671–677. (In Russ.)

2. Doronenkova A.A., Shirokov I.B. Fundamentals of construction and prospects for the development of Connected Car technology. In: Afonin I.L. (ed.) *Sovremennye problemy radioelektroniki i telekommunikatsii: sbornik nauchnykh trudov = Modern problems of radio electronics and telecommunications: collection of scientific papers*. N 5. Moscow: RNTORES im. A.S. Popova; 2022. P. 200. (In Russ.)

3. Guillen M., Nielsen J.P., Ayuso M. The use of telematics devices to improve automobile insurance rates. *Risk Analysis*. 2019;(39):662–672 <https://doi.org/10.1111/risa.13172>

4. Kushelev I.Y. Introduction of innovative information technologies in the insurance market in Russia: telematics in auto insurance. *Putevoditel' predprinimatel'ya = Entrepreneur's Guide*. 2023;16(2):110–119. (In Russ.) <https://doi.org/10.24182/2073-9885-2023-16-2-110-119>

5. Zaineb Chelly Dagdia, Christine Zarges, Gaël Beck, Hanene Azzag, Mustapha Lebbah. A Distributed Rough Set Theory Algorithm based on Locality Sensitive Hashing for an Efficient Big Data Pre-processing. In: *IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*. Seattle, WA: IEEE; 2018. P. 4266–4273. <https://doi.org/10.1109/BigData.2018.8622024>

6. Sterk F., Stocker A., Heinz D., Weinhardt Ch. Unlocking the value from car data: a taxonomy and archetypes of connected car business models. *Electronic Markets*. 2024;34:1. <https://doi.org/10.1007/s12525-024-00692-5>

7. Rozov A.A., Stepanova A.A., Komarova M.V., Solodkova E.V. Connected Cars market: Current state and main development prospects. *Vestnik Altaiskoi akademii ekonomiki i prava = Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2021;(6):90–95. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/vaael.1733>

8. Postolit A.V. Prospects for the application of artificial intelligence and computer vision in transport systems and connected cars. *Mir transporta. Rossiiskii universitet transporta (MIIT) = The world of transport. Russian University of Transport (MIIT)*. 2021;19(1):74–90. (In Russ.)

9. Lashkov I.B. An approach to recognizing the driving style of a vehicle driver based on the use of smartphone sensors. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information*

10. Mandala V., Surabhi S.N.R.D. Integration of AI-driven predictive analytics in-to connected car platforms. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. 2024;7:84–93. <https://doi.org/10.17148/iarjset.2020.71216>

11. Qian Li, Pan Chen, Rui Wang. Edge Computing for Intelligent Transportation System: A Review. In: *Cyberspace Data and Intelligence, and Cyber-Living, Syndrome, and Health: International 2019 Cyberspace Congress, CyberDI and CyberLife, Beijing, China*. Pt. 2. Singapore: Springer; 2019. P. 130–137. http://doi.org/10.1007/978-981-15-1925-3_10

12. Parmar Y., Natarajan S., Sobha G. DeepRange: Deep-learning based object de-tECTION and ranging in autonomous driving. *IET Intelligent Transport Systems*. 2019;13(8):1256–1264.

13. Lyapin S.A., Kapsky D.V., Rizayeva Yu.N., Kadasev D.A. Connected cars in intelligent transport systems of smart cities. In: *Infokommunikatsionnye i intellektual'nye tekhnologii na transporte: sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Information and communication and intelligent technologies in transport: Collection of articles of the International scientific and practical Conference*. Lipetsk: Lipetskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet; 2022. P. 7–14. (In Russ.)

14. Okolnishnikova I.Yu., Keller A.V., Konks V.Ya. Marketing analysis of the global market of telematics transport and information management systems. *Vestnik universiteta = Bulletin of the University*. 2022;(12):46–54. (In Russ.)

15. Permovsky A.A., Uskova A.A. Evaluation of the effectiveness of the implementation of Connected Car technology. *International Journal of Advanced Studies = International Journal of Advanced Studies*. 2021;11(3):68–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2021-11-3-68-75>

16. Permovsky A.A., Uskova A.A. Evaluation of the effectiveness of the implementation of Connected car technology. *International Journal of Advanced Studies = International Journal of Advanced Studies*. 2021;11(3):68–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2021-11-3-68-75>

17. Postolit A.V. Promising services for connected cars based on neural network technologies and computer vision systems. *Novosti navigatsii = Navigation News*. 2021;(1):28–34. (In Russ.)

18. Sanjay P. Pande, Sarika Khandelwal. An Improved Deep Network and Hand-crafted Feature-Based Scene Classification Convolutional Model for Self-Driving Cars. *Communications on Applied Nonlinear Analysis*. 2024;31(2s):593–605.

19. Hassan M., Hussain A., Anwar S. Challenges and Solutions in Integrating AI-Driven Predictive Analytics into Connected Car Platforms. *IEEE International Conference on*

Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD). Chengdu, China: IEEE; 2018. P. 153–157.
<https://doi.org/10.1109/ICAIBD.2018.8372276>

20. Gromov N.D., Saprykin D.A. The use of Internet of Things technologies in self-driving cars and further development paths. *Moya professional'naya kar'era = My Professional Career*. 2021;1(24):109–115.

Информация об авторах / Information about the Authors

Ходукин Роман Александрович, аспирант,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: romakhodukin@gmail.com,
ORCID: 0009-0004-5006-5125

Roman A. Khodukin, Post-Graduate Student,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: romakhodukin@gmail.com,
ORCID: 0009-0004-5006-5125

Томакова Римма Александровна, доктор
технических наук, профессор, профессор
кафедры программной инженерии,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: rtomakova@mail.ru,
Researcher ID: O-6164-2015,
ORCID: 0000-0003-0152-4714

Rimma A. Tomakova, Doctor of Sciences
(Engineering), Professor, Professor
of the Department of Software Engineering,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: rtomakova@mail.ru,
Researcher ID: O-6164-2015,
ORCID: 0000-0003-0152-4714

Малышев Александр Васильевич, кандидат
технических наук, доцент кафедры программной
инженерии, Юго-Западный государственный
университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: alta76@yandex.ru,
ORCID: 0000-0002-99938-3456

Alexander V. Malyshev, Candidate of Sciences
(Engineering), Associate Professor
of the Department of Software Engineering,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: alta76@yandex.ru,
ORCID: 0000-0002-99938-3456

Рекомендационная система антипрокрастинационного трекинга на базе ChatGPT и персональных данных

А. М. Сидоров¹, Р. А. Томакова¹✉, Д. К. Реутов¹✉

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

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Резюме

Цель исследования заключается в анализе возможностей применения языковой модели ChatGPT в составе персонализированной рекомендационной системы, направленной на снижение уровня прокрастинации. В центре внимания модели находится концепция цифрового ассистента, способного адаптивно реагировать на поведенческие особенности пользователя, поддерживать его концентрацию внимания и развивать навыки самодисциплины в условиях информационной перегрузки и цифровых отвлечений.

Методы. В качестве основы системы рассматривается языковая модель ChatGPT, интегрированная с пользовательскими трекерами активности. Система предполагает сбор и анализ таких показателей, как текущее расписание задач, уровень продуктивности, настроение, частота переключений между задачами, а также физиологические параметры (например, пульс, уровень стресса, качество сна) — при наличии соответствующих носимых устройств. Архитектура системы включает контекстный слой для агрегации данных и модуль генерации диалоговых рекомендаций. Реализована стратификация рекомендаций по типам: операционные (немедленные действия), тактические (планирование в течение дня) и мотивационные (поддержка фокусировки и устойчивости). Также предусмотрен механизм адаптации рекомендаций под поведенческий контекст, временные закономерности и состояние пользователя.

Результаты. Описаны функциональные компоненты предлагаемой архитектуры, ключевые пользовательские сценарии и примеры диалоговых взаимодействий. Рассматриваются интерфейсные решения для визуализации прогресса в продуктивности и саморегуляции. Обоснована целесообразность применения языковой модели в роли эмпатичного цифрового коуча, способного учитывать динамику состояния пользователя и обеспечивать поддержку в преодолении прокрастинации.

Заключение. Представленная концепция демонстрирует потенциал ChatGPT в качестве цифрового инструмента, предназначенного для персонализированного взаимодействия, основанного на анализе пользовательского поведения индивида и его допустимых состояний. Языковая модель ChatGPT может быть использована для создания эффективных систем цифрового сопровождения ИИ. Перспективы дальнейших исследований включают разработку механизмов предиктивной логики, интеграцию с биометрическими трекерами и расширение поведенческой модели пользователя.

Ключевые слова: прокрастинация; искусственный интеллект; ChatGPT; персонализация; цифровое благополучие.

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

Для цитирования: Сидоров А. М., Томакова Р. А., Реутов Д. К. Рекомендационная система антипрокрастинационного трекинга на базе ChatGPT и персональных данных // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 2. С. 119–129. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-119-129>

Поступила в редакцию 07.04.2025

Подписана в печать 05.05.2025

Опубликована 30.06.2025

Recommendation system for anti-procrastination tracking based on ChatGPT and personal data

Alexandr M. Sidorov¹, Rimma A. Tomakova¹✉, Dmitry K. Reutov¹

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

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to analyze the potential of integrating the ChatGPT language model into a personalized recommendation system aimed at reducing procrastination. The focus is on the concept of a digital assistant capable of adaptively responding to users' behavioral patterns, maintaining attention, and fostering self-discipline in the context of information overload and constant digital distractions.

Methods. The system is based on the ChatGPT language model integrated with user activity trackers. It is designed to collect and analyze data such as task schedules, productivity levels, mood, task-switching frequency, and physiological parameters (e.g., heart rate, stress level, sleep quality) where wearable devices are available. The system architecture includes a contextual layer for data aggregation and a dialogue generation module for personalized recommendations. Recommendations are stratified into operational (immediate actions), tactical (daily planning), and motivational (focus and resilience support) types. The system also provides mechanisms for adapting recommendations based on behavioral context, temporal patterns, and user state.

Results. The paper describes the functional components of the proposed architecture, key user interaction scenarios, and examples of dialogue interventions. Interface solutions for visualizing progress in productivity and self-regulation are discussed. The feasibility of using a language model as an empathetic digital coach that can respond to users' dynamic states and provide supportive guidance for overcoming procrastination is substantiated.

Conclusion. The proposed concept demonstrates the potential of ChatGPT as a tool for digital well-being. Personalized interaction based on the analysis of user behavior and states may serve as a foundation for the development of effective digital self-regulation systems. Future research directions include the implementation of predictive logic, integration of biometric tracking, and expansion of the behavioral model.

Keywords: procrastination; artificial intelligence; ChatGPT; personalization; digital well-being.

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

For citation: Sidorov A.M., Tomakova R.A., Reutov D.K. Recommendation system for anti-procrastination tracking based on ChatGPT and personal data. *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*. 2025;15(2):119–129. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-119-129>

Received 07.04.2025

Accepted 05.05.2025

Published 30.06.2025

Введение

Современное информационное пространство формирует среду, в которой пользователи ежедневно сталкиваются с высоким уровнем когнитивной нагрузки [1], множеством параллельных задач и постоянным воздействием отвлекающих факторов [2]. На этом фоне особенно остро проявляется феномен прокрастинации – осознанного откладывания выполнения значимых задач, несмотря на понимание их важности и сроков выполнения [3]. Последствия прокрастинации выражаются не только в снижении продуктивности, но и в нарастании психологического дискомфорта, тревожности, эмоционального выгорания и срывов [4].

Исследования, проведенные в [5], показывают, что одной из причин формирования прокрастинационного поведения является постоянное воздействие цифровых стимулов [6]: уведомлений, коротких видео, алгоритмически подобранного контента, усиливающего стремление к мгновенному вознаграждению [7]. Эти стимулы формируют дофамин-зависимые поведенческие цепочки, которые затрудняют концентрацию на сложных, но значимых задачах [8].

В ответ на перечисленные вызовы особую актуальность приобретают цифровые решения [9], направленные на

поддержку саморегуляции и формирования продуктивных поведенческих стратегий. Одним из таких решений может выступать диалоговая система [10], построенная на основе языковой модели, способная адаптироваться к контексту и поведению пользователя [11]. В частности, модель ChatGPT демонстрирует высокий потенциал для использования в роли цифрового ассистента [12], предоставляющего рекомендации в реальном времени с учётом эмоционального и поведенческого фона [13].

Анализ проведенных исследований в области рекомендательных систем [14] позволяет реализовывать многоуровневую персонализацию, учитывая не только цели пользователя, но и его текущее состояние, временные закономерности и привычки [15]. Кроме того, внедрение в такие системы принципов explainable AI и эмпатичного взаимодействия повышает доверие и вовлечённость пользователя [16]. Отечественные [17], [18] и зарубежные исследования [19], [20] в области цифрового благополучия подчёркивают эффективность таких подходов как в образовательной, так и в профессиональной среде.

В рамках настоящего исследования рассматривается концепт антипрокрастинационной системы, основанной на интеграции ChatGPT с пользовательскими

трекерами активности. Основное внимание уделяется возможностям адаптивного диалога, классификации рекомендаций по уровням (операционному, тактическому, мотивационному) и реализации механизмов обратной связи, направленных на устойчивое изменение поведения [20].

Современные достижения в области искусственного интеллекта (ИИ) позволяют создавать адаптивные инструменты, способные не только отслеживать поведение пользователя, но и формировать персонализированные рекомендации по самодисциплине и управлению вниманием. В частности, языковые модели нового поколения, такие как ChatGPT, предоставляют возможность создания интерактивных цифровых помощников, способных вести поддерживающий диалог, интерпретировать эмоциональный контекст и предлагать действенные микроинтервенции [11].

Настоящая работа посвящена проектированию и прототипированию системы антипрокрастинационного трекинга, сочетающей возможности нейросетевой модели ChatGPT и анализа пользовательской активности. В статье рассматривается архитектура системы, форматы взаимодействия, механизмы рекомендаций и примеры пользовательских сценариев.

Прокрастинация, согласно современным исследованиям, охватывает до 80–90% студентов и более 50% взрослых, работающих в условиях гибкого графика [5]. Это явление связано не

столько с ленью, сколько с психоэмоциональными барьерами: страхом неудачи, перфекционизмом, низкой мотивацией и прокрастинационной деструктивной петлёй, подпитываемой цифровыми раздражителями.

Усиление зависимости от быстрых источников удовольствия приводит к снижению толерантности к усилиям и откладыванию задач с отсроченной выгодой. Например, вместо написания отчета пользователь инстинктивно тянется к просмотру коротких видео, получая немедленный отклик в виде быстрого дофамина [7]. Подобные поведенческие шаблоны закрепляются на нейронном уровне, что делает борьбу с прокрастинацией особенно сложной.

Многие современные приложения для продуктивности предлагают инструменты планирования и отслеживания задач, но не учитывают мотивационные и психологические аспекты. В результате пользователи быстро теряют к ним интерес. Эффективное решение требует интерактивного, эмпатичного, адаптивного подхода, именно такую роль может взять на себя ИИ-ассистент на базе языковой модели.

Материалы и методы

Разрабатываемая система представляет собой веб-приложение, в основе которого лежит взаимодействие между пользователем и языковой моделью ChatGPT, обогащённой контекстом из персонализированных трекеров активности. Сбор и хранение пользовательских

данных осуществляется с согласия пользователя и включает:

- расписание задач;
- количество выполненных дел;
- время, проведённое в продуктивных и отвлекающих приложениях;
- субъективную самооценку и настроение;

– динамику физиологических параметров (при наличии носимых устройств).

Особенность архитектуры разрабатываемой системы заключается в применении контекстного слоя, агрегирующего данные из трекеров и подготавливающего их в формате, удобном для подачи в модель ChatGPT (табл.1).

Таблица 1. Компоненты системы и их функции

Table 1. System components and their functions

Компонент	Назначение
User Tracker	Сбор данных о действиях пользователя
Emotion & Focus Logger	Отслеживание настроения и уровня фокуса
GPT-коуч	Диалоговый модуль, генерирующий рекомендации
Recommendation Engine	Алгоритм подбора персональных микроцелей
Dashboard UI	Интерфейс мониторинга прогресса

Рекомендации разделяются на 3 уровня:

1. **Операционные** («Сделай 5-минутный перерыв», «Сфокусируйся на одной задаче»).

2. **Тактические** («Разбей большую задачу на 3 части», «Попробуй технику Pomodoro»).

3. **Мотивационные** («Ты уже выполнил 60% недели – не останавливайся!»).

Следует отметить, что одной из особенностей предлагаемой системы является применение механизма контекстной адаптации, при котором рекомендации корректируются в зависимости от времени суток, предыдущих попыток и поведенческих закономерностей (табл. 2).

Таблица 2. Примеры рекомендаций в зависимости от контекста

Table 2. Examples of recommendations depending on the context

Сценарий	Тип рекомендации	Пример
Частые переключения между вкладками	Операционная	«Открой только нужные вкладки на 25 мин»
Снижение активности и плохое настроение	Мотивационная	«Сделай 3 глубоких вдоха. Ты не один»
Затяжной дедлайн	Тактическая	«Разбей задачу на 3 части и начни с лёгкой»

Например, при выявлении циклической прокрастинации после обеда система может заранее предложить рутинную задачу для «разгона» или напоминание о перерыве.

Пример взаимодействия:

Пользователь:

«Мне сложно начать работать над отчётом, не могу собраться».

Система:

«Понимаю. Давай начнём с малого: выдели 10 минут только на вводную

часть. Хочешь, я помогу сформулировать первый абзац?»

Позже система может дополнительно уточнить:

«Как ты себя сейчас чувствуешь? Хочешь включить фоновую музыку или переключиться на другую задачу?»

Коммуникация с пользователем осуществляется в формате диалога, в процессе которого модель анализирует запросы и актуальные состояния, предлагая возможные релевантные действия, представленные ниже (рис. 1).

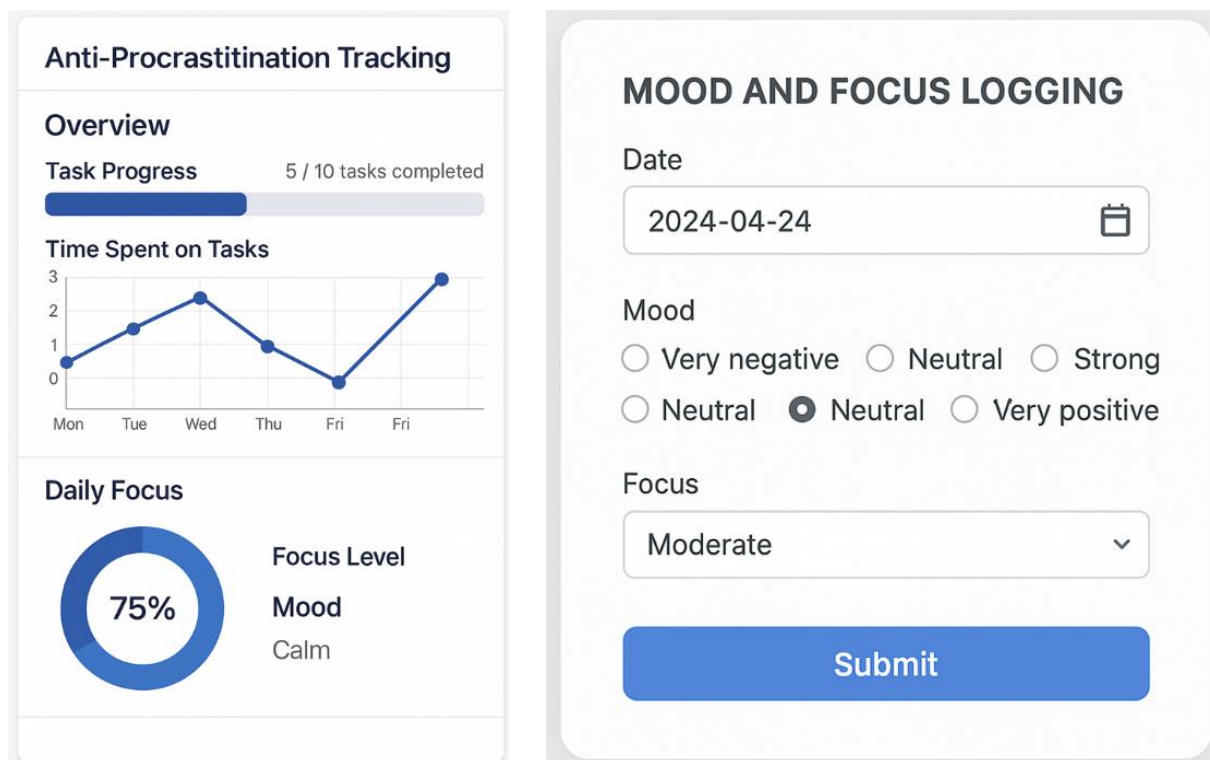


Рис. 1. Примерный интерфейс программы

Fig. 1. Example of the program interface

Результаты и их обсуждение

Представленная концепция рекомендательной системы на базе языковой модели ChatGPT демонстрирует потенциал нейросетевых технологий в облас-

ти цифрового благополучия и поведенческой саморегуляции. За счёт диалогового взаимодействия и адаптации рекомендаций к текущему контексту пользователь получает не просто фиксатор продуктивности, а персонального цифро-

вого помощника, способного учитывать эмоциональное состояние, поведенческие шаблоны и динамику внимания.

Интеграция с персональными данными (такими, как расписание, продуктивность, частота отвлечений и показатели самочувствия) позволяет генерировать рекомендации, максимально приближённые к реальным потребностям пользователя. Это создаёт предпосылки для формирования устойчивых поведенческих изменений и повышения самодисциплины без давления и жёстких ограничений.

Выводы

Представленная концепция рекомендационной системы с использованием языковой модели ChatGPT демонстрирует потенциал нейросетевых технологий в задачах цифрового сопровождения, саморегуляции и преодоления прокрастинации. За счёт адаптации к поведенческому и эмоциональному контексту пользователя такая система может выполнять роль цифрового ассистента, способного не только реагировать на текущее состояние, но и формировать устойчивые стратегии продуктивного поведения.

В перспективе система может быть дополнена модулями голосового взаимо-

действия, автоматического анализа биометрических данных (включая показатели variability сердечного ритма, уровня кортизола и качества сна), а также механизмами предиктивной аналитики. Это позволит не только фиксировать признаки снижения продуктивности, но и прогнозировать риски прокрастинации на ранней стадии, предлагая проактивные меры поддержки.

Кроме того, значительный интерес представляют исследования, направленные на изучение долгосрочного влияния таких цифровых ассистентов на личностное развитие, эмоциональную устойчивость и сопротивляемость стрессовым факторам в различных социальных и профессиональных контекстах. Особое внимание может быть уделено вопросам доверия к ИИ, этике использования персональных данных и обеспечению психологического комфорта при взаимодействии с машинной рекомендацией.

Таким образом, предложенная система представляет собой шаг в сторону создания адаптивных, эмпатичных и персонализированных инструментов поддержки продуктивности и цифрового благополучия в условиях стремительно развивающейся информационной среды.

Список литературы

1. Смирнова Т. А. Саморегуляция и цифровые технологии: вызовы и возможности // Человеческий капитал. 2022. № 9. С. 115–120.
2. Dhamija S., Kumar R. Digital Wellbeing: A Review of Tools, Impact and Future Directions // IJIMAI. 2021. Vol. 6(4). P. 28–39.
3. Кузьмина Ю. В. Психологические аспекты прокрастинации и пути их коррекции // Вестник ТвГУ. Серия: Педагогика и психология. 2020. № 2. С. 56–62.
4. Steel P. The Procrastination Equation: How to Stop Putting Things Off and Start Getting Stuff Done. Random House of Canada, 2011. 352 p.
5. Громов Е. И. Прокрастинация как феномен информационного общества // Социология власти. 2018. № 5. С. 142–148.
6. Fogg B. J. Tiny Habits: The Small Changes That Change Everything. New York: Houghton Mifflin Harcourt, 2020. 306 p.
7. Куртаев С. Ж. Цифровое благополучие как компонент психологической устойчивости в цифровой среде // Психология и общество. 2021. № 4. С. 24–28.
8. Baumeister R. F., Tierney J. Willpower: Rediscovering the Greatest Human Strength. New York: Penguin Books, 2012. 291 p.
9. Макарова Н. А. Модель адаптивной поддержки принятия решений в обучающих системах с ИИ // Информационные технологии. 2020. № 7. С. 35–41.
10. GPT-4. URL: <https://openai.com/research/gpt-4> (дата обращения: 27.03.2025).
11. Малышева О. Н. Эмпатичные ИИ-системы: перспективы и ограничения применения в сфере цифрового коучинга // Вопросы психологии. 2021. № 6. С. 98–107.
12. Wu Y., Chen H. Enhancing Productivity through Personalized AI Assistants: Design Principles // HCI International 2022 – Late Breaking Papers: Ergonomics and Product Design: 24th International Conference on Human-Computer Interaction, HCII 2022, Virtual Event, June 26–July 1, 2022. Cham: Springer, 2022. P. 387–403.
13. Zhang Y., Chen X. Explainable Recommendation: A Survey and New Perspectives // Foundations and Trends in Information Retrieval. 2020. Vol. 14(1). P. 1–101.
14. Шевченко А. А. Рекомендательные системы: принципы, алгоритмы и методы // Вестник Новосибирского государственного университета. 2019. Т. 17, № 2. С. 78–91.
15. Deep Learning for Anomaly Detection: A Review / G. Pang, C. Shen, L. Cao, A. Hengel van den // ACM Computing Surveys. 2021. Vol. 54(2). P. 1–38.

16. Ribeiro M. T., Singh S., Guestrin C. "Why should I trust you?": Explaining the Predictions of Any Classifier. URL: <https://arxiv.org/abs/1602.04938> (дата обращения: 11.03.2025).
17. Холодная М. А. Интеллектуальные ресурсы личности: структура, диагностика, развитие. СПб.: Питер, 2017.
18. Степанов И. В., Антипова Н. М. Информационная усталость и цифровая саморегуляция: вызовы цифровой эпохи // Психология образования в XXI веке. 2021. № 2. С. 90–97.
19. Zeng Z., Wei Y. Emotion-Aware Intelligent Systems: A Survey // ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems. 2020. Vol. 10(2). P. 12.
20. Stawarz K., Cox A. L., Blandford A. Beyond Self-Tracking and Reminders: Designing Smartphone Apps That Support Habit Formation // CHI '15: Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems. Seoul, South Korea, 2015. P. 2653–2662. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702230>

References

1. Smirnova T.A. Self-regulation and digital technologies: challenges and opportunities. *Chelovecheskii kapital = Human Capital*. 2022;(9):115–120. (In Russ.)
2. Dhamija S., Kumar R. Digital Wellbeing: A Review of Tools, Impact and Future Directions. *IJIMAI*. 2021;6:28–39.
3. Kuzmina Yu.V. Psychological aspects of procrastination and ways of their correction. *Vestnik TvGU. Seriya: Pedagogika i psikhologiya = Vestnik TvGU. Series: Pedagogy and Psychology*. 2020;(2):56–62. (In Russ.)
4. Steel P. The Procrastination Equation: How to Stop Putting Things Off and Start Getting Stuff Done. Random House of Canada; 2011. 352 p.
5. Gromov E.I. Procrastination as a phenomenon of the information society. *Sotsiologiya vlasti = Sociology of Power*. 2018;(5):142–148. (In Russ.)
6. Fogg B.J. Tiny Habits: The Small Changes That Change Everything. New York: Houghton Mifflin Harcourt; 2020. 306 p.
7. Kurtaev S.J. Digital well-being as a component of psychological stability in the digital environment. *Psikhologiya i obshchestvo = Psychology and Society*. 2021;(4):24–28. (In Russ.)
8. Baumeister R.F., Tierney J. Willpower: Rediscovering the Greatest Human Strength. New York: Penguin Books; 2012. 291 p.

9. Makarova N.A. Model of adaptive decision support in learning systems with AI. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technologies*. 2020;(7):35–41. (In Russ.)
10. GPT-4. Available at: <https://openai.com/research/gpt-4> (accessed 27.03.2025).
11. Malysheva O.N. Empathic AI systems: prospects and limitations of application in the field of digital coaching. *Voprosy psikhologii = Issues of Psychology*. 2021;(6):98–107. (In Russ.)
12. Wu Y., Chen H. Enhancing Productivity through Personalized AI Assistants: Design Principles. In: *HCI International 2022 – Late Breaking Papers: Ergonomics and Product Design. 24th International Conference on Human-Computer Interaction, HCII 2022, Virtual Event, 26 June – 1 July 2022*. Cham: Springer; 2022. P. 387–403.
13. Zhang Y., Chen X. Explainable Recommendation: A Survey and New Perspectives. *Foundations and Trends in Information Retrieval*. 2020;14:1–101.
14. Shevchenko A.A. Recommendation systems: principles, algorithms and methods. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Novosibirsk State University*. 2019;17(2):78–91. (In Russ.)
15. Pang G., Shen C., Cao L., Hengel A. van den. Deep Learning for Anomaly Detection: A Review. *ACM Computing Surveys*. 2021;54:1–38.
16. Ribeiro M.T., Singh S., Guestrin C. "Why should I trust you?": Explaining the Predictions of Any Classifier. Available at: <https://arxiv.org/abs/1602.04938> (accessed 11.03.2025).
17. Kholodnaya M.A. Intellectual resources of personality: structure, diagnosis, development. Saint Petersburg: Piter; 2017. (In Russ.)
18. Stepanov I.V., Antipova N.M. Information fatigue and digital self-regulation: challenges of the digital age. *Psikhologiya obrazovaniya v XXI veke = Psychology of Education in the 21st century*. 2021;(2):90–97. (In Russ.)
19. Zeng Z., Wei Y. Emotion-Aware Intelligent Systems: A Survey. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*. 2020;10:12.
20. Stawarz K., Cox A.L., Blandford A. Beyond Self-Tracking and Reminders: Designing Smartphone Apps That Support Habit Formation. In: *CHI '15: Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. Seoul, South Korea; 2015. P. 2653–2662. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702230>

Информация об авторах / Information about the Authors

Сидоров Александр Михайлович, студент
кафедры программной инженерии,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: alex19992010@yandex.ru,
ORCID: 0009-0000-0371-498X

Alexandr M. Sidorov, Student of the Department
of Software Engineering, Southwest State
University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: alex19992010@yandex.ru,
ORCID: 0009-0000-0371-498X

Томакова Римма Александровна, доктор
технических наук, профессор, профессор
кафедры программной инженерии,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: rtomakova@mail.ru,
Researcher ID: O-6164-2015,
ORCID: 0000-0003-0152-4714,

Rimma A. Tomakova, Doctor of Sciences
(Engineering), Professor, Professor
of the Department of Software Engineering,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: rtomakova@mail.ru,
Researcher ID: O-6164-2015,
ORCID: 0000-0003-0152-4714

Реутов Дмитрий Константинович,
преподаватель кафедры программной
инженерии, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: sdfh.sgh@inbox.ru,
ORCID: 0009-0007-6969-2286

Dmitry K. Reutov, Lecturer
of the Department of Software Engineering,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: sdfh.sgh@inbox.ru,
ORCID: 0009-0007-6969-2286

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-130-152>



УДК 519.81

Определение центральной температуры тела при предсменном медицинском осмотре

В. В. Савченко¹ ✉, В. А. Сясько¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д. И. Менделеева
Московский пр-т, д. 19, г. Санкт-Петербург 190005, Российская Федерация

✉ e-mail: sav4enk0@mail.ru

Резюме

Цель исследования – разработка методики косвенной оценки центральной температуры тела по результатам измерений частоты сердечных сокращений и температуры ладоней с использованием комплекта технических средств в процессе прохождения теста сложной зрительно-моторной реакции.

Методы. В процессе разработки была проведена серия обследований с последовательным измерением ЦТТ медицинским термометром и КТС, используемых в разрабатываемой методике измерения. Полученные результаты измерений были обобщены регрессионным анализом, на основе полученных обобщений был синтезирован набор данных для обучения регрессионной модели алгоритма машинного обучения «случайный лес». Разработанная методика измерений верифицирована в соответствии с требованиями, предъявляемыми к измерению ЦТТ при проведении предсменных медицинских осмотрах.

Результаты. В результате проведенных исследований и выявленных параметров (препроцессинга данных, синтеза данных и алгоритма регрессионной модели) была разработана методика косвенной оценки ЦТТ, определены ее точностные характеристики.

Закключение. Разработанная методика соответствует требованиям нормативных документов, предъявляемым к измерению ЦТТ при прохождении предсменных медицинских осмотров. Методика применяется в диапазоне температуры окружающей среды от 18 до 35°C, диапазон измерения ЦТТ от 35 до 42°C, абсолютная погрешность измерения ЦТТ $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Методика аттестована и зарегистрирована Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). Номер свидетельства об аттестации методики (метода) измерений – 2207/2411-(RA.RU.310494)-2023, номер в реестре – ФР.1.32.2024.47935. С использованием методики разработано специальное программное обеспечение «Оценка функционального состояния». СПО зарегистрировано Федеральной службой по интеллектуальной собственности (Роспатент) и внесено в реестр программ для ЭВМ. Номер свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ – 2024612210. Разработанное в соответствии с методикой СПО используется в программно-аппаратном комплексе, предназначенном для проведения предсменных медицинских осмотров.

Ключевые слова: центральная температура тела; температура ладоней; температура в подмышечной впадине; частота сердечных сокращений; алгоритм ЕСТепр; регрессионный анализ; методы машинного обучения.

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

Для цитирования: Савченко В. В., Сясько В. А. Определение центральной температуры тела при предсменном медицинском осмотре // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 2. С. 130–152. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-130-152>

Поступила в редакцию 17.04.2025

Подписана в печать 12.05.2025

Опубликована 30.06.2025

Determination of core body temperature during pre-shift medical examination

Vyacheslav V. Savchenko¹, Vladimir A. Syasko¹ ✉

¹ D.I. Mendeleev Institute for Metrology
19 Moskovsky Ave., St. Petersburg 190005, Russian Federation

✉ e-mail: sav4enk0@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop a method for indirect assessment of core body temperature based on measurements of heart rate and palm temperature using a technical equipment kit during a complex visual-motor reaction test.

Methods. During the development process, a series of examinations were conducted with sequential measurements of CBT using a medical thermometer and the TEK employed in the proposed measurement method. The obtained measurement results were processed using regression analysis, and based on the derived generalizations, a dataset was synthesized for training a machine learning regression model using the "random forest" algorithm. The developed measurement method was verified in accordance with the requirements for CBT assessment during pre-shift medical examinations.

Results. As a result of the conducted research and the identified parameters (data preprocessing, data synthesis and the regression model algorithm), a technique for indirect assessment of CTT was developed, and its accuracy characteristics were determined.

Conclusion. The developed method complies with the regulatory requirements for CBT measurement during pre-shift medical examinations. The method is applicable within an ambient temperature range of 18 to 35°C, measures CBT in the range of 35 to 42°C, and has an absolute measurement error of $\pm 0.1^\circ\text{C}$. The method has been certified and registered by the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology (Rosstandart). The certification number for the measurement method is 2207/2411-(RA.RU.310494)-2023, and the registry entry number is FR.1.32.2024.47935. Based on this method, specialized software (SSW) "Functional State Assessment" was developed. The SSW is registered with the Federal Service for Intellectual Property (Rospatent) and included in the register of computer programs. The state registration number for the computer program is 2024612210. The SSW, developed in accordance with the proposed method, is used in a hardware-software complex designed for conducting pre-shift medical examinations.

Keywords: core body temperature; palm temperature; axillary temperature; heart rate; ECTemp algorithm; regression analysis; machine learning methods.

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

For citation: Savchenko V.V., Syasko V.A. Determination of core body temperature during pre-shift medical examination. *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*. 2025;15(2):130–152

Введение

Согласно части 2 статьи 46 Федерального закона «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации»¹, одним из видов медицинских осмотров являются предсменные медицинские осмотры, проводимые перед началом рабочего дня (смены) в целях выявления признаков воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов, состояний и заболеваний, препятствующих выполнению трудовых обязанностей.

Основные категории работников, которые обязаны проходить медицинский осмотр в начале рабочего дня: специалисты, в чьи трудовые обязанности входит подземная работа²; профессиональные водители³; машинисты различных видов железнодорожного транспорта и их помощники⁴; лица, занятые на работах, носящих опасный характер, в число которых входят некоторые специалисты атомной и химической промышленности⁵.

¹ Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации: Федеральный закон от 21.11.2011 г. № 323-ФЗ: [ред. от 24.07.2023 г.]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_121895/ (дата обращения: 20.03.2025).

² Трудовой кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 30.12.2001 г. № 197-ФЗ: [ред. от 07.04.2025 г.]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/ (дата обращения: 20.03.2025).

³ О безопасности дорожного движения: Федеральный закон от 10 декабря 1995 г. № 196-ФЗ. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=490068> (дата обращения: 20.03.2025).

⁴ Об утверждении перечня профессий работников, производственная деятельность которых непосредственно связана с движением поездов и маневровой работой на железнодорожном транспорте общего пользования, подлежащих обязательным предрейсовым или предсменным медицинским осмотрам: приказ Министерства транспорта Российской

Федерации от 28.03. 2007 г. № 36. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=106112> (дата обращения: 20.03.2025).

⁵ Об утверждении требований к проведению медицинских осмотров и психофизиологических обследований работников объектов использования атомной энергии, порядка их проведения, перечня медицинских противопоказаний для выдачи разрешения на выполнение определенных видов деятельности в области использования атомной энергии и перечня должностей работников объектов использования атомной энергии, на которые распространяются данные противопоказания, а также формы медицинского заключения о наличии (отсутствии) медицинских противопоказаний для выдачи разрешения на выполнение определенных видов деятельности в области использования атомной энергии: приказ Министерства здравоохранения РФ от 28.07.2020 г. № 749н. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1100&documentId=10688> (дата обращения: 20.03.2025).

В перечень основных физиологических показателей при проведении предсменных медицинских осмотров входят: частота сердечных сокращений (ЧСС), измерение температуры тела¹. В качестве психофизиологических показателей используются: вариабельность сердечного ритма (измерение 3–5 мин) для оценки общего функционального состояния организма, время и количество ошибок сложной зрительно-моторной реакции (СЗМР) для оценки уровня работоспособности².

Автоматизация предсменных медицинских осмотров является актуальной задачей. Решение этой задачи позволит сократить время проведения таких

медосмотров за счет автоматизации рутинных процессов измерения показателей, увеличить достоверность получаемых данных с помощью использования аппаратно-программных средств измерения, исключающих человеческий фактор, вести компьютерный учет проведенных измерений при помощи электронных журналов медицинских осмотров.

В статье описывается измерение ЧСС и температуры тела при прохождении обследуемым теста СЗМР (длительность измерения 3–5 мин) с помощью комплекта технических средств (КТС): компьютера, монитор и два джойстика. В джойстики встроены металлические

¹ Об утверждении порядка и периодичности проведения предсменных, предрейсовых, послесменных, послерейсовых медицинских осмотров, медицинских осмотров в течение рабочего дня (смены) и перечня включаемых в них исследований: приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 30.05.2023 г. № 266Н. URL: https://rabota-bryanskobl.ru/cms_data/usercontent/regionaleditor/файлы/охрана%20труда/федеральное%20законодательство/приказ%20минздрава%20рф%20от%2030.05.2023%20н%20266н%20об%20утверждении%20порядка%20и%20периодичности%20проведения.pdf (дата обращения: 20.03.2025); Об утверждении порядка проведения обязательных предрейсовых или предсменных медицинских осмотров на железнодорожном транспорте»: приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 12.01. 2021 г. № 4. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=383028> (дата обращения: 20.03.2025).

² Об утверждении требований к проведению медицинских осмотров и психофизиологических обследований работников объектов использования атомной энергии, порядка их проведения, перечня медицинских противопоказаний для выдачи разрешения на выполнение определенных видов деятельности в области использования атомной энергии и перечня должностей работников объектов использования атомной энергии, на которые распространяются данные противопоказания, а также формы медицинского заключения о наличии (отсутствии) медицинских противопоказаний для выдачи разрешения на выполнение определенных видов деятельности в области использования атомной энергии: приказ Министерства здравоохранения РФ от 28.07.2020 г. № 749Н. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1100&documentId=10688> (дата обращения: 20.03.2025).

пластины для регистрации температуры ладоней и электрической активности сердца (ЭАС). Сигнал ЭАС используется для расчета ЧСС. Такой подход позволяет существенно сократить общее время обследования (несколько основных параметров регистрируются одновременно) и увеличить достоверность результатов (расчет параметров и запись результатов в память компьютера осуществляется в автоматическом режиме без непосредственного участия медицинского работника).

При измерении температуры тела в медицинских целях традиционно термометр размещают в трех положениях: 1) аксиллярно – в подмышечной впадине (в России), нормальная температура $36,6\text{--}37,2^{\circ}\text{C}$, средняя $36,6^{\circ}\text{C}$; 2) орально (в англоязычных странах), нормальная температура $36,4\text{--}37,2^{\circ}\text{C}$, средняя $36,8^{\circ}\text{C}$; 3) ректально (в Европе) нормальная температура $36,8\text{--}37,6^{\circ}\text{C}$, средняя $37,5^{\circ}\text{C}$ [1; 2].

Все три положения градусника обеспечивают измерение значения температуры, максимально близкой к так называемой центральной температуре тела (ЦТТ). Другие названия ЦТТ: ядерная температура, базальная температура или температура внутренних органов. В норме ЦТТ составляет $36,1\text{--}37,8^{\circ}\text{C}$ [3]. Средней нормальной температурой принято считать температуру крови в правом желудочке сердца, где она равна примерно 37°C [2].

Аксиллярная, оральная, ректальная и центральная температура различаются

между собой, но хорошо коррелируют [1].

Кроме этого, в ряде случаев температуру тела измеряют в ухе (наиболее близкое неинвазивное измерение ЦТТ), но такие измерения редки в повседневной практике и встречаются в основном в клинических или лабораторных условиях [1]. Также электронные термометры измеряют температуру на лбу, смарт-часы измеряют температуру на запястье [4; 5]. Оба этих метода требуют пересчета измеренной температуры с помощью специально разработанных алгоритмов к значениям одного из трех традиционных методов измерения, в зависимости от региона. Пересчет необходимо выполнять для сравнения конечными пользователями значений измеренной температуры с диапазонами норм, к которым они привыкли.

Важной является температурная схема тела – распределение показателей температуры по поверхности кожи и разным органам называется температурной схемой тела. При этом следует различать ЦТТ – «ядро» и температуру поверхности тела – «оболочку». Температура «ядра» поддерживается на постоянном уровне, в нем образуется большая часть тепла. В условиях холода объем «ядра» уменьшается, а температура оболочки при этом понижается. В условиях тепла «ядро» увеличивает свой объем, а температура оболочки повышается [2].

Температура ладоней и пальцев рук относится к температуре оболочки и в норме составляет $24\text{--}36^{\circ}\text{C}$ (средняя

$33 \pm 1,2^\circ\text{C}$) [6]. Температура ладоней зависит от колебания кровотока в дистальных отделах верхних конечностей [7] и, как следствие, в отличие от ЦТТ зависит от температуры окружающей среды [8]. Эти особенности усложняют использование температуры ладоней для прогнозирования ЦТТ. Абсолютная погрешность определения ЦТТ с помощью температуры ладоней по разным данным составляет от $\pm 1,2$ до $\pm 1,5^\circ\text{C}$ [9].

В последние десятилетия было предпринято несколько попыток неинвазивного прогнозирования ЦТТ, используя один или несколько физиологических параметров (например, ЧСС или температуру поверхности тела в разных точках) [10; 11]. Алгоритм Estimated Core Temperature (ECTemp) был

разработан для оценки ЦТТ только на основе последовательных наблюдений ЧСС с использованием фильтра Калмана и линейной регрессии [12] или логистической регрессии [13]. Результаты апробации алгоритма показывают, что ЧСС с достаточно высокой эффективностью можно использовать для вычисления ЦТТ. Абсолютная погрешность определения ЦТТ с помощью алгоритма ECTemp составляет от $\pm 0,3$ до $\pm 0,6^\circ\text{C}$ в зависимости от диапазона, погрешность выше при определении высоких значений ЦТТ [12; 13].

В России все нормативные документы для диапазона температуры тела «в норме» при приведении предменных медицинских осмотров разработаны для измерения в подмышечной впадине¹.

¹ Об утверждении требований к проведению медицинских осмотров и психофизиологических обследований работников объектов использования атомной энергии, порядка их проведения, перечня медицинских противопоказаний для выдачи разрешения на выполнение определенных видов деятельности в области использования атомной энергии и перечня должностей работников объектов использования атомной энергии, на которые распространяются данные противопоказания, а также формы медицинского заключения о наличии (отсутствии) медицинских противопоказаний для выдачи разрешения на выполнение определенных видов деятельности в области использования атомной энергии: приказ Министерства здравоохранения РФ от 28.07.2020 г. № 749н. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1100&documentId=10688> (дата обращения: 20.03.2025); Об утверждении порядка и периодичности

проведения предменных, предрейсовых, послесменных, послерейсовых медицинских осмотров, медицинских осмотров в течение рабочего дня (смены) и перечня включаемых в них исследований: приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 30.05.2023 г. № 266н. URL: https://rabota-bryanskobl.ru/cms_data/usercontent/regionaleditor/файлы/охрана%20труда/федеральное%20законодательство/приказ%20минздрава%20рф%20от%2030.05.2023%20н%20266н%20об%20утверждении%20порядка%20и%20периодичности%20проведения.pdf (дата обращения: 20.03.2025); Об утверждении порядка проведения обязательных предрейсовых или предменных медицинских осмотров на железнодорожном транспорте: приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 12.01.2021 г. № 4. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=383028> (дата обращения: 20.03.2025).

Согласно требованиям к проведению медицинских осмотров, измерение температуры тела человека должно проводиться в диапазоне от 35,0 до 42,0°C с пределом допустимой абсолютной погрешности $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ ¹ на всем диапазоне измерений и может проводиться при температуре окружающего воздуха от 18 до 35°C².

Следовательно, для принятия решения о допуске или не допуске к выполнению рабочих обязанностей на основе измерения температуры тела с ладоней необходимо разработать алгоритм пересчета значения этой температуры в температуру подмышечной впадины. Однако на основе анализа данных литературных источников становится очевидно, что для достижения косвенного измерения ЦТТ с необходимой абсолютной погрешностью, равной $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ измерений, только температуры ладоней недостаточно, а еще одним потенциально подходящим для косвенного измерения ЦТТ параметром является ЧСС.

Материалы и методы

Объем проведенных исследований

Для обоснования и разработки алгоритма пересчета температуры и ЧСС, полученных от ладоней, в ЦТТ была

проведена серия обследований. Во время обследований проводили последовательные измерения: 1) температуры в подмышечной впадине медицинским термометром; 2) температуры ладоней и ЧСС с помощью КТС (рис. 1, а).

Для измерения температуры в подмышечной впадине прямым методом использовали термометр медицинский стеклянный «ИМПЭКС-МЕД» с термометрической жидкостью (номер в ФИФОЕИ: 52345-12), со следующими метрологическими характеристиками: диапазон измерений от 35 до 42°C, пределы допускаемой абсолютной погрешности $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Время измерения от 6 до 10 мин, результат измерения заносили в протокол обследований.

После измерения температуры медицинским термометром проводили измерения с помощью КТС. Термометр в составе КТС (детектор касания и регистрации температуры, зав. № 220110), сертификат калибровки № 22-43546 от 16.12.2022 г. со следующими метрологическими характеристиками: диапазон измерений температуры тела человека от 18 до 42°C, пределы допускаемой погрешности $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ на всем диапазоне измерений.

¹ ГОСТ 31516-2012. Термометры медицинские максимальные стеклянные. Введ. 2015-01-01. М.: Ствндартинформ, 2013. 16 с.

² Об утверждении санитарных правил СП 2.1.3678-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к эксплуатации помещений, зданий, сооружений, оборудования и транспорта, а также условиям деятельности

хозяйствующих субъектов, осуществляющих продажу товаров, выполнение работ или оказание услуг»: постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 24.12.2020 г. № 44: [зарегистрировано в Минюсте России 30.12.2020 г. № 61953]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573275590> (дата обращения: 20.03.2025).

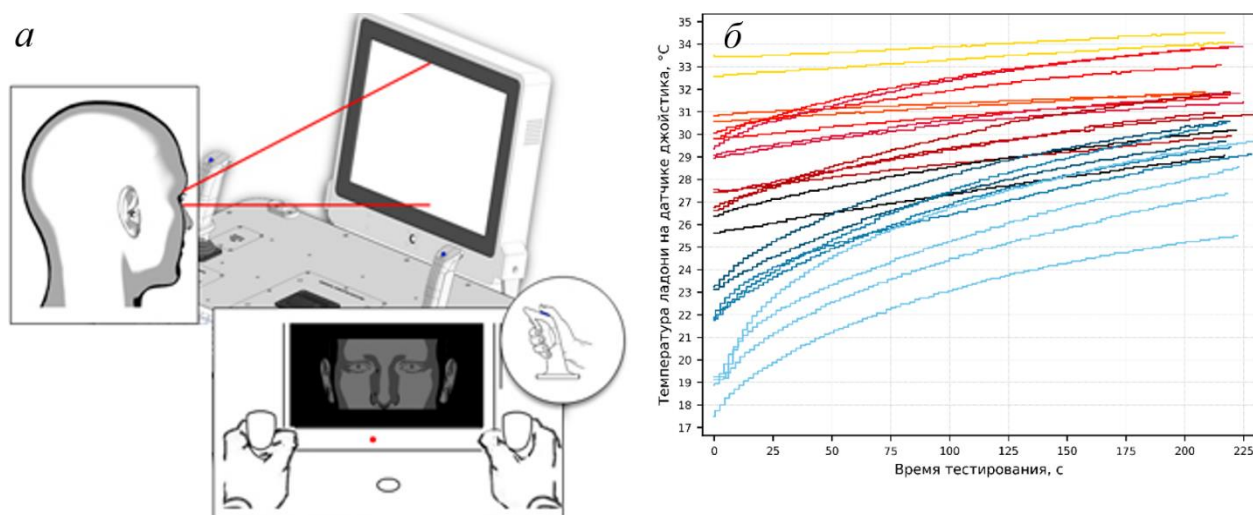


Рис. 1. КТС для выполнения теста СЗМР с одновременной регистрацией температуры ладоней и ЭАС: а – общий вид КТС; б – зависимость динамики изменения температуры ладони на датчике джойстика от начальной температуры и времени тестирования при ЦТТ, равной 36,8°C, у одного обследуемого

Fig. 1. TEK for performing the CVMR test with simultaneous recording of palm temperature and EAS: а – general view of the TEK; б – dependence of palm temperature dynamics on the joystick sensor on initial temperature and testing time at a CBT of 36,8°C in one subject

При выполнении измерений на КТС обследуемый берет в руки джойстики, в которые встроены металлические пластины с интегральными датчиками температуры и ЭАС, и не отпускает их все время тестирования (рис. 1, а). В случае если обследуемый отпускает джойстики, КТС на основе анализа сигнала ЭАС детектирует это событие, и тестирование начинают заново. Во время тестирования в разных частях экрана случайным образом предъявляют красные и синие круги. Обследуемый согласно инструкции нажимает на кнопки правого (красный круг) или левого (синий круг) джойстиков. Длительность измерения зависит от времени прохождения обследуемым теста СЗМР и составляет от 3,5 до 5 мин.

По описанной схеме было проведено 868 измерений. В измерениях приняли участие 21 человек (13 мужчин и 8

женщин) в возрасте от 20 до 60 лет. Диапазон температуры подмышечной впадины измеренной медицинским термометром составил от 35,0 до 38,9°C. Диапазон температуры на датчиках джойстиков в начале измерения составил от 18 до 34°C. Диапазон ЧСС при измерении температуры составил от 57 до 117 уд./мин.

Отечественный датчик температуры, используемый в джойстиках, показывает не мгновенную температуру в единицу времени, а динамику температуры (процесс нагрева) металлической пластины, контактирующей с ладонью обследуемого во время прохождения тестирования. На рисунке 1, б представлены примеры записей динамики изменения температуры ладони на датчике правого джойстика при прохождении 25 тестирований на КТС одним обследуемым при температуре подмышечной

впадины, равной $36,8^{\circ}\text{C}$. На рисунке 1, б видно, что значения температуры на датчике джойстика в начале теста могут сильно отличаться в разных обследованиях, это связано с тем, что датчик реагирует на изменения температуры окружающей среды. Кроме этого, за время теста значения температуры ладони на датчике не успевают выйти на плато.

Представленные особенности работы датчика температуры, используемого в КТС, указывают на то, что алгоритм измерения ЦТТ не может строиться на пересчете абсолютного значения температуры ладони на датчике джойстика в ЦТТ. Алгоритм пересчета может быть построен на поиске закономерности между приростом температуры в единицу времени в зависимости от текущей температуры ладони на датчике джойстика и ЦТТ обследуемого.

Использование для пересчета фильтра Кальмана, как в работах [10; 12; 13], в данном случае также не подходит, так как в процессе измерения меняется температура (среднее значение и дисперсия) не только измеряемого объекта (ладони), но и измеряющего объекта (металлической пластины). При таких условиях отдельную линейную модель с использованием фильтра Кальмана необходимо построить для каждого значения температуры на датчике джойстика, что является чрезвычайно сложной задачей.

Кроме этого, очевидно, что изменение температуры на датчике джойстика при измерении зависит от множества факторов: температуры окружающей среды, разницы между температурой ладони и температурой металлической

пластины датчика. Температура ладони также нелинейно связана с ЦТТ [2; 7] и, как следствие, с температурой подмышечной впадины.

По этим причинам для достижения необходимой абсолютной погрешности измерения, равной $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, при пересчете в ЦТТ наряду с температурой ладони на датчике джойстика целесообразно использовать данные ЧСС на основании результатов опубликованных исследований [10; 12; 13] (в частности, алгоритма ECTemp).

С учетом вышесказанного для разработки алгоритма измерения ЦТТ по результатам оценки ЧСС и температуры ладоней во время прохождения теста СЗМР представляется возможным использование комбинированных методов машинного обучения как наиболее мощных и эффективных реализаций нелинейных регрессионных моделей на текущий момент времени [14].

Представленные закономерности указывают на то, что разработка алгоритма расчета ЦТТ сводится к решению следующих задач:

1. Получить набор данных для создания регрессионной модели. Зависимая переменная регрессионной модели – ЦТТ, измеренная в подмышечной впадине (диапазон от 35 до 42°C). Независимые переменные:

- температура ладони на датчике джойстика (диапазон от 18 до 35°C);
- прирост температуры на датчике джойстика за единицу времени;
- ЧСС в этот момент времени.

2. Выявить и систематизировать закономерности:

– прироста температуры на датчике джойстика в зависимости от текущей температуры ладони на датчике и температуры в подмышечной впадине;

– величины ЧСС в зависимости от температуры в подмышечной впадине.

3. На основе выявленных закономерностей синтезировать набор данных для обучения алгоритма регрессионной модели. Данные для обучения должны содержать все возможные сочетания зависимой переменной и независимых переменных во всех необходимых диапазонах.

4. Выбрать алгоритм машинного обучения для регрессионной модели и обучить его синтезированным набором данных.

5. Провести валидацию алгоритма. Проверить результаты работы алгоритма на соответствие заявленной абсолютной погрешности измерения ЦТТ на реальных данных.

Предварительная обработка данных записей обследований

Частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП) КТС выбрана равной 250 Гц, что обусловлено необходимой точностью распознавания RR интервалов в сигнале ЭАС. Данные датчика температуры также оцифровываются АЦП с частотой 250 Гц, однако сам датчик обновляет значения температуры раз в 2 с, при этом исходная запись сигнала температуры на датчике джойстика до предварительной обработки имеет ступенчатую структуру.

На основе результатов предварительных исследований единицей времени для расчета ЦТТ в регрессионной модели была установлена 1 с (1 Гц). В соответствии с этой настройкой записи данных 868 измерений были пересчитаны, последовательность действий при пересчете представлена ниже (табл. 1).

Таблица 1. Последовательность предварительной обработки записей температуры ладоней и ЭАС

Table 1. Preprocessing of records palm temperature and electrical activity of heart

Предобработка записей температуры ладоней (отдельно для левого и правого джойстика)	Предобработка записей сигнала ЭАС
Запись значений температуры с частотой 250 Гц, значения температуры обновляются раз в 2 с	Запись ЭАС с частотой 250 Гц; фильтрация сигнала ЭАС в диапазоне от 1 до 30 Гц; распознавание R-зубцов; расчет RR-интервалов; расчет ЧСС по RR-интервалам
Интерполяция значений температуры с частотой 250 Гц	Интерполяция значений ЧСС с частотой 250 Гц
Усреднение значений температуры за 1 с – T_j	Усреднение значений ЧСС за 1 с – HR
Вычисление разницы между соседними односекундными интервалами, прирост температуры T_{jd}	
Формирование строки данных за 1 с. Независимые переменные в строке: 1) температура ладони на датчике T_j ; 2) прирост температуры на датчике T_{jd} ; 3) ЧСС HR . Зависимая переменная в строке: температура в подмышечной впадине, ЦТТ – T_B (из протокола обследований)	

Результатом предварительной обработки является объединенная таблица данных 868 измерений, разбитых на одnoseкундные отрезки. Столбцы таблицы: температура ладони на датчике, прирост температуры на датчике, ЧСС, температура в подмышечной впадине (ЦТТ). Строки таблицы: одnoseкундные отрезки, синхронизированные по времени.

Поиск закономерностей прироста температуры на датчике джойстика в зависимости от текущей температуры ладони на датчике и температуры в подмышечной впадине

Строки объединенной таблицы данных были разбиты на диапазоны по значению температуры ладони на датчике джойстика с шагом в 1°C . Для каждого диапазона методом линейной регрессии были найдены коэффициенты линейных уравнений (1), усредняющих прямых прироста температуры в зависимости от значения температуры в подмышечной впадине (рис. 2, б).

$$T_{Jd} = k \cdot T_B + b \text{ для } T_{Jn} \in [n; n+1), \\ n \in [18; 34], \quad (1)$$

где T_{Jd} – прирост температуры на датчике джойстика за 1 с, $^{\circ}\text{C}$; T_B – температура в подмышечной впадине, $^{\circ}\text{C}$; k – найденный вес линейной модели; b – найденное смещение линейной модели; T_J – температура ладони на датчике джойстика.

Пример расчета коэффициентов линейного уравнения для диапазона T_J , равного 31°C , представлен на рисунке 2, а. В соответствии с данными, полученными в результате измерений, были найдены коэффициенты 17 линейных уравнений (1) для диапазонов T_J от 18 до 34°C с шагом 1°C (рис. 2, в и 2, г). Графики значений коэффициентов линейных уравнений были интерполированы в точках, в которых значения графиков отклоняются от наблюдаемой тенденции.

На рисунке 2, б видно, что величина T_{Jd} зависит от разницы между температурой ладони обследуемого (связана с температурой в подмышечной впадине) и температурой металлической пластины датчика на джойстике. Температура ладони, в свою очередь, зависит от ЦТТ (измеренной в подмышечной впадине) и температуры металлической пластины. Эти взаимосвязи выражаются в том, что величина T_{Jd} растет по мере увеличения разницы между температурами ладони (температура подмышечной впадины) и металлической пластины. Однако увеличение T_{Jd} происходит до определенного момента, после которого с увеличением разницы между температурой ладони и пластины величина T_{Jd} начинает уменьшаться. Такое изменение величины T_{Jd} связано с изменением (уменьшением) кровотока в ладони, вызванного соприкосновением с холодной поверхностью.

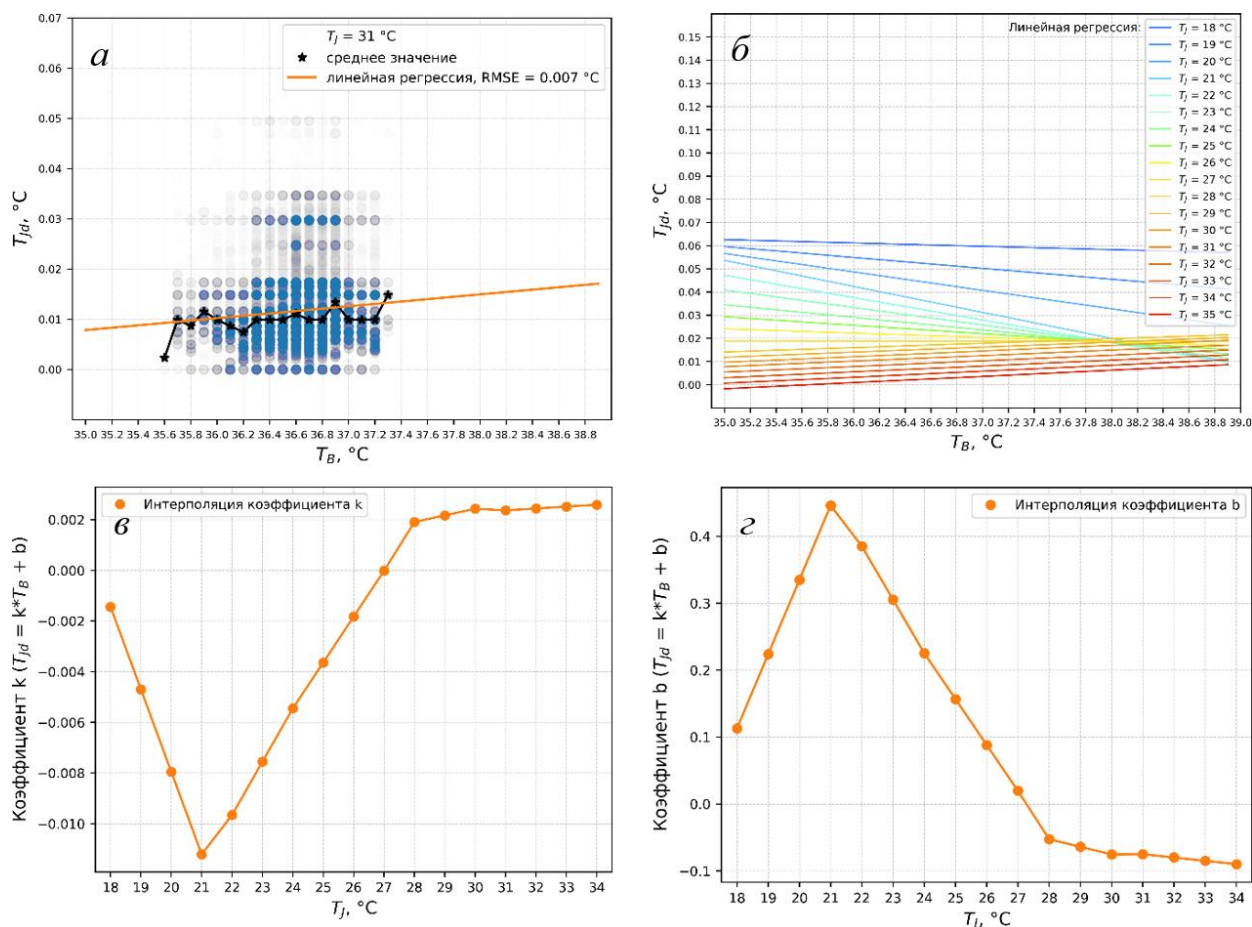


Рис. 2. Расчет коэффициентов линейных уравнений усредняющих прямых T_{Jd} в зависимости от T_B для разных диапазонов T_J : а – пример расчета для $T_J = 31$ °C; б – прямые прироста T_{Jd} для разных диапазонов; в и г – графики коэффициентов k и b для разных диапазонов

Fig. 2. Calculation of coefficients for linear equations of averaging lines T_{Jd} depending on T_B for different T_J ranges: а – example of calculation for $T_J = 31$ °C; б – T_{Jd} increment lines for different ranges; в and г – plots of coefficients k and b for different ranges)

Полученные результаты совпадают с результатами, описанными в [8].

Поиск закономерности величины ЧСС в зависимости от температуры в подмышечной впадине

Выявленная зависимость ЧСС (HR) от T_B представлена ниже (рис. 3). Величина HR (синие точки) взаимосвязана с T_B : чем выше T_B , тем выше HR . Зависимость стремится к сигмовидной форме (черная кривая усредненных значений HR).

Для синтеза данных зависимости величины HR от T_B было использовано преобразованное уравнение логистической регрессии (2) алгоритма ЕСTemp [13] (оранжевая кривая на рис. 3).

$$HR = A + \frac{K - A}{(1 + 0,06e^{-0,89(T_B - M)})^{1/0,07}}, \quad (2)$$

где HR – ЧСС, уд./мин; T_B – температура в подмышечной впадине, °C; A (минимальная ЧСС) = 41 уд./мин; K (максимальная ЧСС) = 140 уд./мин; M (средняя ЦТТ) = 37,1 °C.

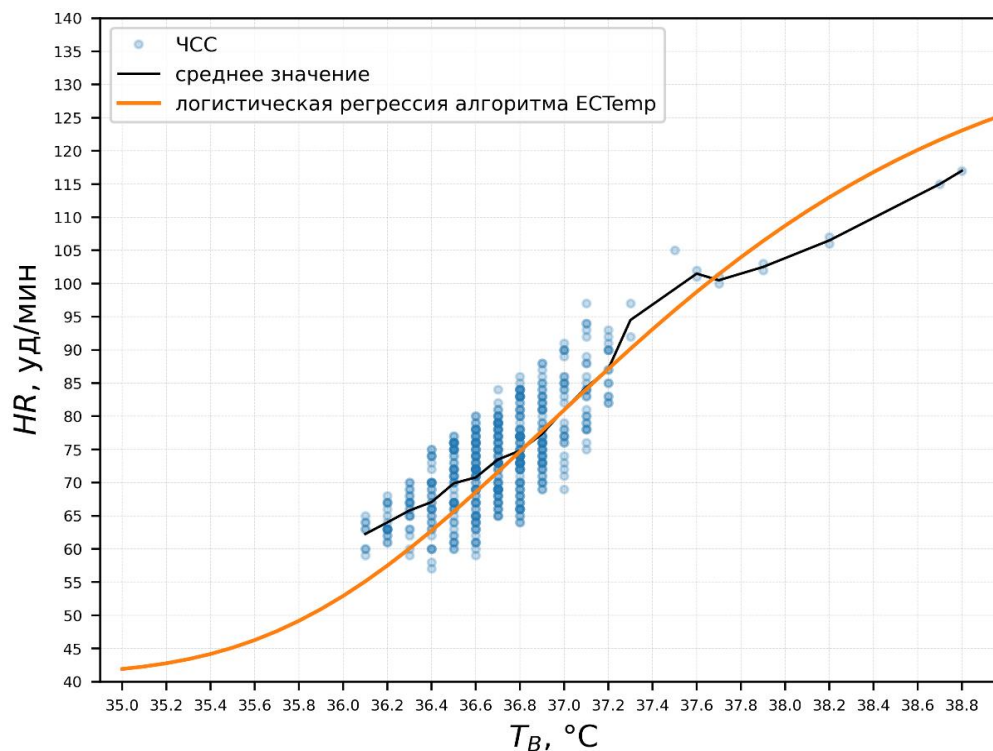


Рис. 3. Функциональная зависимость $HR = f(T_B)$

Fig. 3. Functional relationship $HR = f(T_B)$

Оригинальная логистическая функция алгоритма ECTemp отражает зависимость ЧСС от ЦТТ, зарегистрированной с помощью термометрической таблетки в условиях выполнения высокой физической нагрузки [12; 13]. В настоящем исследовании ЦТТ измеряется с помощью медицинского термометра в подмышечной впадине в сидячем положении с минимизацией движений, не связанных с проведением измерения. В соответствии с этими различиями коэффициенты уравнения (2) были преобразованы на основе данных измерений, полученных при разработке текущей методики. Было уменьшено среднее значение ЦТТ (было 37,84, стало 37,1°C) и максимальное значение ЧСС (было 193 стало 140 уд./мин). На рисунке 3 видно, что после преобразования коэффициентов

сигмоида алгоритма ECTemp хорошо аппроксимирует результаты измерений, полученные при разработке методики, и с ее помощью можно синтезировать данные для обучения регрессионной модели.

Синтез данных для обучения алгоритма регрессионной модели

На основе синтезированных линейной регрессией (1) данных T_{Jd} , в зависимости от значений T_B , для разных диапазонов T_J и синтезированных логистической регрессией (2) данных HR , в зависимости от значений T_B , был собран набор данных со всеми возможными комбинациями для обучения алгоритма регрессионной модели. Зависимая переменная регрессионной модели: T_B , диапазон от 35,0 до 42,0°C с шагом 0,1°C. Независимые переменные регрессион-

ной модели: 1) T_J , диапазон от 18 до 35°C с шагом 0,1°C; 2) T_{Jd} , диапазон от -0,02 до 0,06°C; 3) HR , диапазон от 41 до 140 уд./мин. Было создано 241542 строки

данных, при этом один набор данных был создан с $T_{Jd} = 0$ для обучения алгоритма регрессионной модели только на основе значений ЧСС (рис. 4).

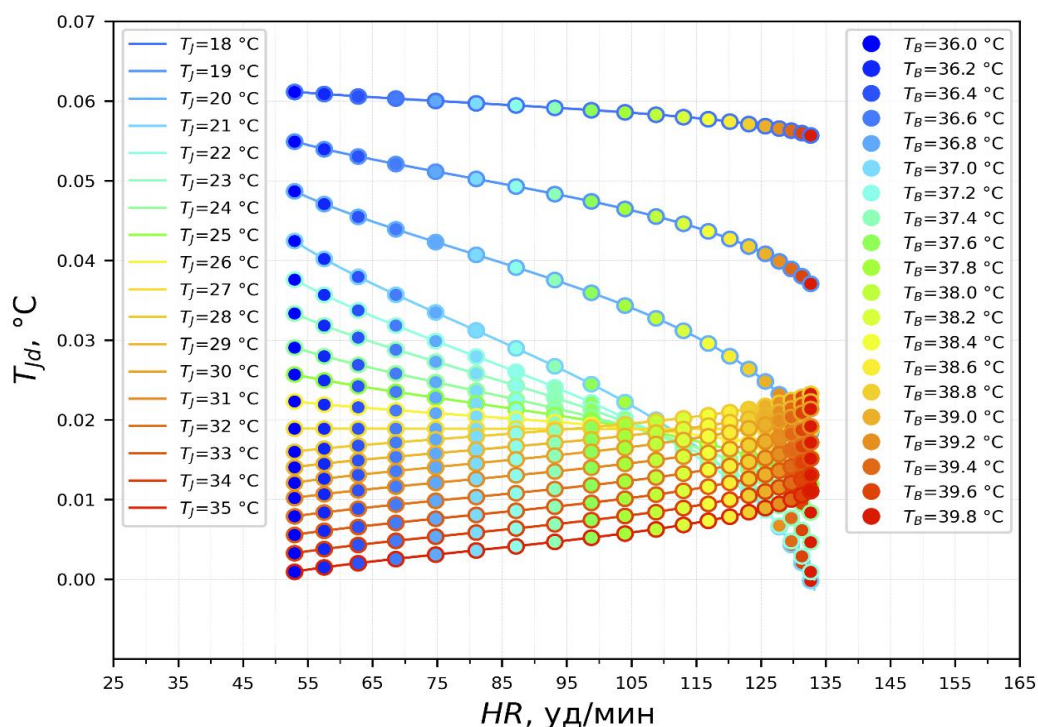


Рис. 4. Фрагмент комбинаций, синтезированных данных для обучения алгоритма регрессионной модели

Fig. 4. Fragment of synthesized data combinations used for training the regression model algorithm

На рисунке 4 видно, что синтезированные данные отражают особенности зависимости величины T_{Jd} от величины разницы между температурой ладони (зависит от ЦТТ) и температурой металлической пластины датчика. Также видно, что синтезированный набор данных отражает связь увеличения HR с увеличением T_B .

Выбор алгоритма машинного обучения для регрессионной модели

В качестве алгоритма регрессионной модели используется современная

модификация метода машинного обучения «случайный лес» [15] под названием «градиентный бустинг» [16; 17]. Основная идея метода заключается в использовании большого ансамбля решающих деревьев (разбиение, или bootstrap), каждое из которых само по себе дает невысокое качество результата, но за счет их усреднения (aggregation) итоговый результат обладает высокой точностью.

Основная особенность модификации метода «случайный лес» под названием «градиентный бустинг» заключается в том, что цель каждого следующего

слабого алгоритма – учиться на ошибках предыдущего. Таким образом, создается последовательность деревьев, которые соответствуют набору данных [16; 17].

В процессе обучения алгоритма на синтезированных данных были выявлены

оптимальные параметры для обучения: количество бинарных деревьев 100; минимальное количество признаков 1 при максимальном количестве признаков 3; скорость обучения 0,1. Рассмотрим схему обучения алгоритма (рис. 5).

$$D = (a_{ij}), i = 241542, j = 3$$

$$a_{i1}: T_{Jn+1} = T_{Jn} + d (^{\circ}\text{C}), n \in [18; 35], d = 0,1$$

$$a_{i2}: T_{Jd} (^{\circ}\text{C}) \in [-0,02; 0,06]$$

$$a_{i3}: HR (\text{уд/мин}) \in [41; 140]$$

Скорость обучения = 0,1

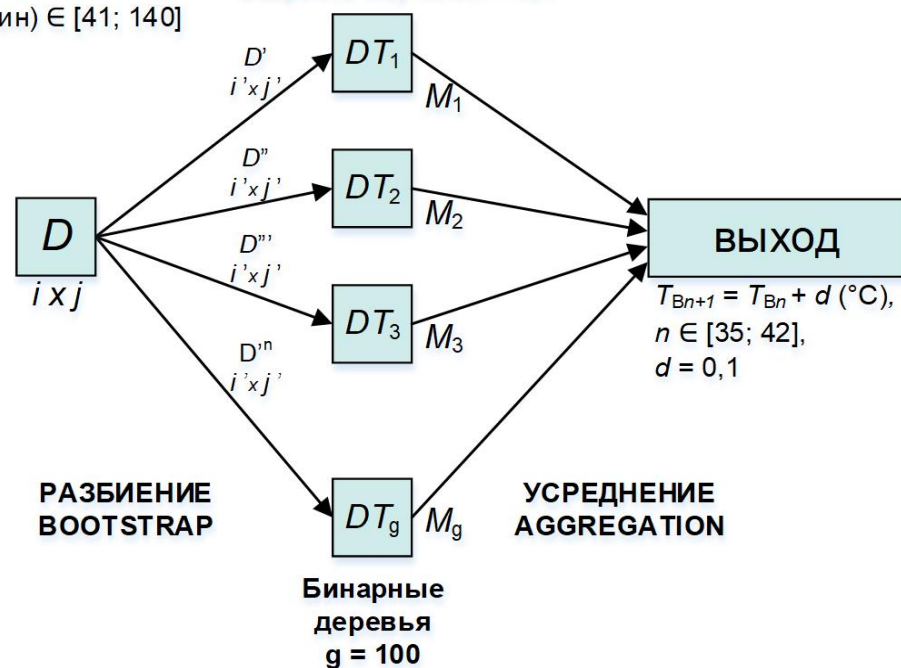


Рис. 5. Схема обучения алгоритма регрессионной модели

Fig. 5. Regression model algorithm training scheme

Результаты и их обсуждение

Валидация алгоритма оценки ЦТТ на основе измерения температуры ладоней и ЧСС во время прохождения теста СЗМР

Последовательность работы алгоритма (рис. 6):

- 1) предварительная обработка данных (табл. 1);
- 2) формирование строки данных за 1 с: T_J , T_{Jd} , HR ;

3) пересчет строки данных за 1 с в T_B с помощью обученного алгоритма регрессионной модели;

4) расчет медианы по всем однокундным точкам пересчета T_B , отдельно для левого и правого джойстика (рис. 6, з);

5) формирование результата измерения T_B как наибольшего значения между двумя медианами пересчета для левого и правого джойстиков (рис. 6, з).

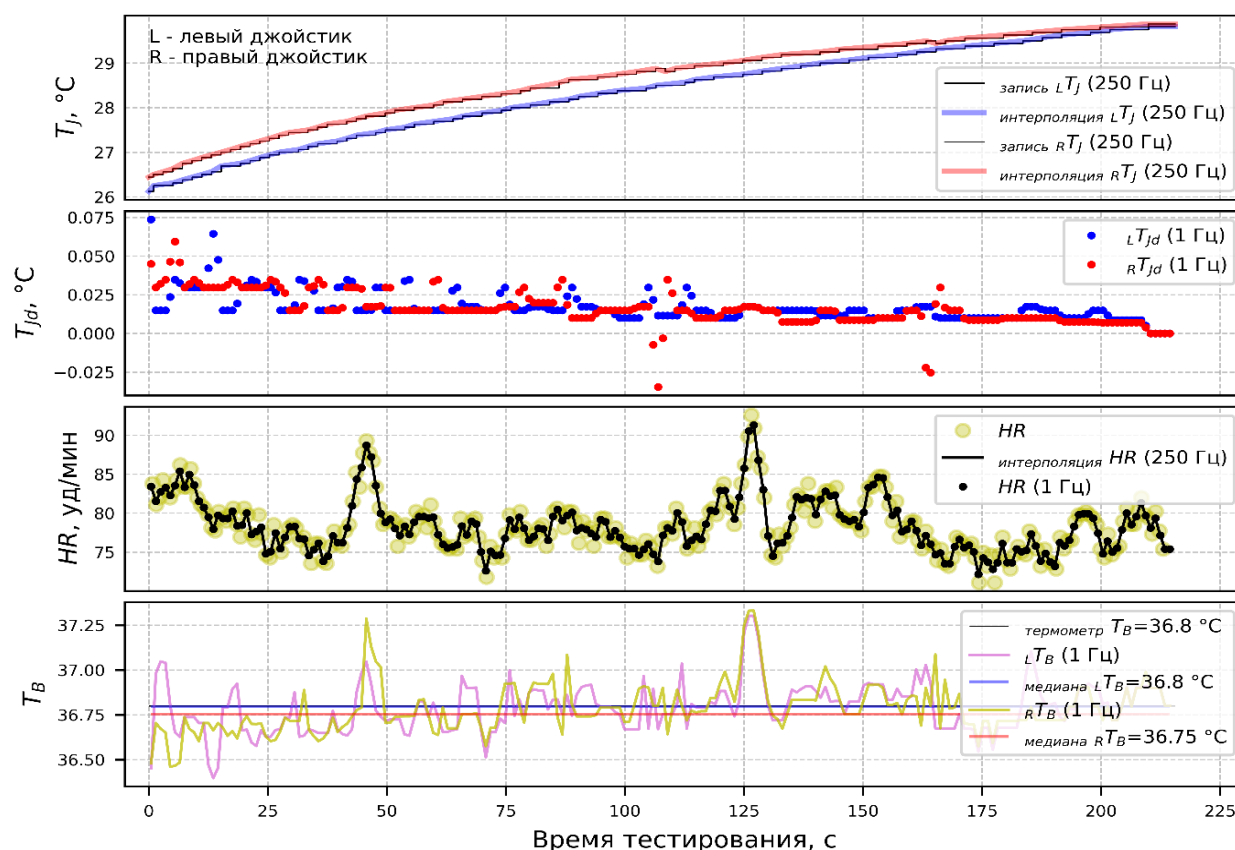


Рис. 6. Иллюстрация последовательности работы алгоритма оценки ЦТТ на примере одного измерения

Fig. 6. Illustration of the CBT assessment algorithm workflow using an example measurement

На рисунке 6 видно, что четвертым параметром при оценки T_B вместе с T_J , T_{Jd} , HR является время измерения, которое соответствует времени прохождения теста СЗМР и может составлять от 3,5 до 5 мин, в зависимости от скорости прохождения теста обследуемым. За время тестирования значение медианы односекундных отрезков пересчета параметров температуры ладони и ЧСС в ЦТТ максимально приближается к реальной ЦТТ обследуемого.

Сравнения алгоритмов оценки ЦТТ

Данные всех измерений, проведенных в рамках разработки методики, были

пересчитаны в ЦТТ. Данные ЧСС при прохождении теста СЗМР на КТС были пересчитаны в ЦТТ с помощью двух оригинальных модификаций алгоритма ЕС-Temp с линейной (linear) и логистической (logistic) зависимостью ЧСС от ЦТТ. Также оценка ЦТТ осуществлялась с использованием разработанного алгоритма в трех модификациях: 1) только на основе данных ЧСС; 2) только на основе данных температуры ладоней на джойстиках; 3) на основе данных температуры ладоней на джойстиках и ЧСС.

После пересчета ЦТТ сравнивалась с температурой подмышечной впадины, измеренной с помощью медицинского

термометра. Средняя абсолютная погрешность 5 алгоритмов оценки ЦТТ по

всем проведенным измерениям представлена ниже (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение средней абсолютной погрешности алгоритмов оценки ЦТТ

Table 2. Comparison of the average absolute error of CTT estimation algorithms

Показатель	ECTemp (linear)	ECTemp (logistic)	Алгоритм	Алгоритм	Алгоритм
Входные данные	ЧСС	ЧСС	ЧСС	t ладоней на джойстиках	t ладоней на джойстиках + ЧСС
Абсолютная погрешность	$\pm 0,4$ °C	$\pm 0,6$ °C	$\pm 0,4$ °C	$\pm 1,1$ °C	$\pm 0,3$ °C

В таблице 2 видно, что самое низкое значение средней абсолютной погрешности у разработанного алгоритма при использовании для пересчета данных как ЧСС, так и температуры ладоней. Этот результат подтверждает эффективность разработанной регрессионной модели на основе синтезированных данных. Высокое значение ($\pm 0,6$ °C) средней абсолютной погрешности оригинального алгоритма ECTemp (logistic) связано с тем, что пересчет в ЦТТ с его помощью проводился без корректировки коэффициентов логистической функции. Оригинальная логистическая функция алгоритма ECTemp (logistic) отражает зависимость ЧСС от ЦТТ, измеренной в условиях, отличных от условий проводимых измерений в рамках разработки текущей методики.

При анализе результатов измерений проведенных исследований было установлено, что значения температуры, полученные с помощью медицинского термометра, могут не соответствовать ЦТТ

в момент измерения на КТС по нескольким причинам:

1) между контрольным измерением и измерением на КТС проходит время – около 15 мин, за это время температура подмышечной впадины может измениться, так как ЦТТ человека подвержена изменениям, в том числе за небольшие промежутки времени (от нескольких десятков секунд), например, в силу эмоциональных реакций, возникших во время прохождения тестирования на КТС;

2) сложно контролировать точность измерения температуры обследуемыми в подмышечной впадине в некоторых случаях (при небольших значениях температуры до 36,0°C). Она может быть измерена не до конца, это может происходить в силу разных причин (например, градусник неплотно прилегает к подмышечной впадине).

После экспертной оценки на основе анализа ЧСС такие измерения были убраны из набора данных. После чего

среднее значение абсолютной погрешности разработанного алгоритма составило $\pm 0,18^{\circ}\text{C}$.

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что для повышения точности процедуры верификации разработанного алгоритма оценки ЦТТ на новых устройствах проведения предсменного медицинского осмотра необходимо разработать процедуру одновременной регистрации ЦТТ, ЧСС и температуры ладоней. Процедура одновременно регистрации должна основываться на разработке новых программных и технических средств метрологической поверки.

Проверка разработанного алгоритма оценки ЦТТ на соответствие заявленным требованиям

Результаты оценки ЦТТ с помощью разработанного алгоритма пересчета на основе данных измерения температуры с ладоней и ЧСС сравнивались с температурой подмышечной впадины, измеренной с помощью медицинского термометра.

Результаты сравнения усреднялись отдельно для разных диапазонов: температуры на датчиках джойстиков в начале измерения (косвенно отражает температуру окружающей среды) и ЦТТ. Рассмотрим результаты сравнения (рис. 7).

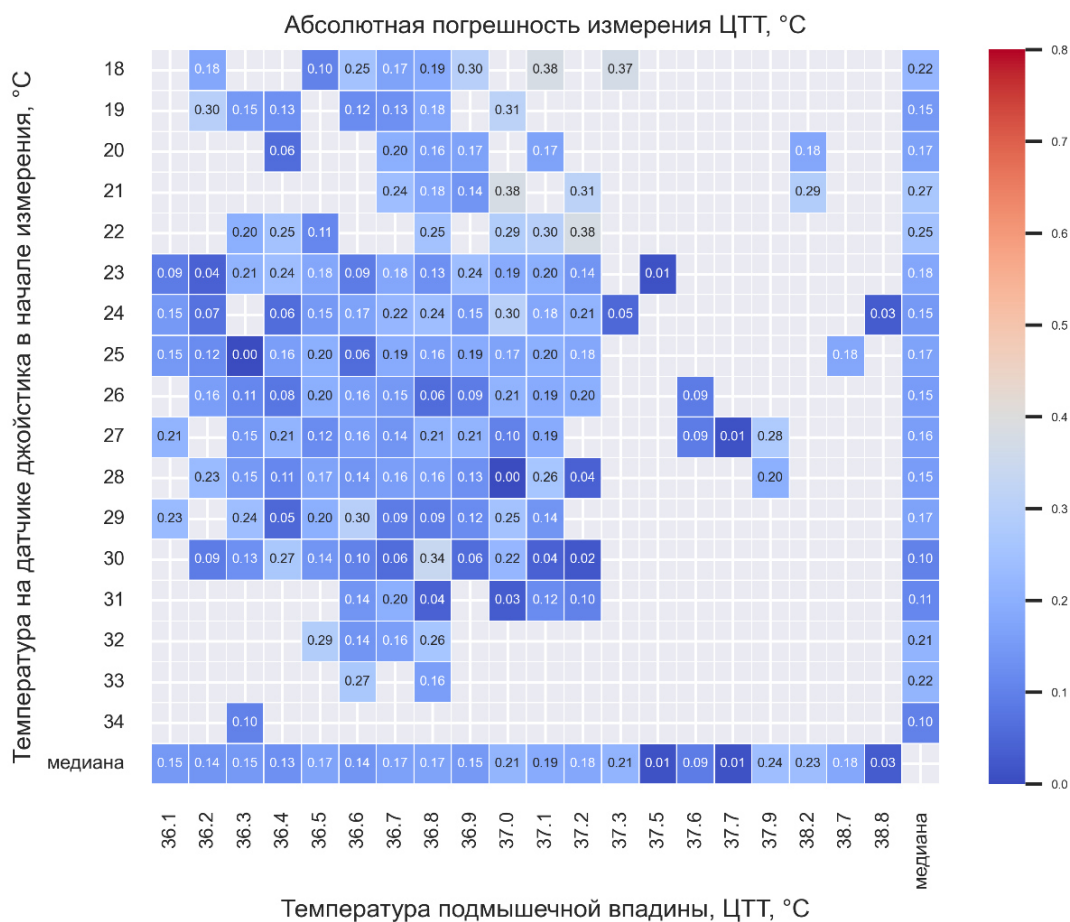


Рис. 7. Результаты валидации алгоритма

Fig. 7. Algorithm validation results

Заявленная абсолютная погрешность применения алгоритма считается достигнутой, если на всем диапазоне измерений удовлетворяет неравенству уравнения (3):

$$|T_k - T_a| \leq \Delta T_{\text{доп.к}} + \Delta T_{\text{доп.а}}, \quad (3)$$

$$|T_k - T_a| \leq 0,2, \quad (4)$$

где T_k – температура, измеренная контрольным термометром, °C; T_a – температура, измеренная с помощью алгоритма, °C; $\Delta T_{\text{доп.к}}$ – допустимая погрешность контрольного термометра 0,1°C; $\Delta T_{\text{доп.а}}$ – установленная погрешность алгоритма 0,1°C.

На рисунке 7 после округления значений абсолютной погрешности оценки ЦТТ до десятых результаты работы алгоритма на всем диапазоне измерений удовлетворяют неравенству (3), кроме 25% клеток, значения в которых незначительно выше 0,2°C, что связано с неодновременным, а последовательным измерением ЦТТ с помощью медицинского термометра и алгоритма оценки.

Работу алгоритма оценки ЦТТ на основе измерений и пересчета температуры ладоней и ЧСС во время прохождения теста СЗМР следует признать удовлетворяющей заявленным требованиям.

Выводы

Разработанный алгоритм оценки ЦТТ на основе измерений и пересчета

температуры ладоней и ЧСС во время прохождения теста СЗМР соответствует требованиям, предъявляемым к измерению температуры тела при проведении медицинских осмотров.

На основе разработанного алгоритма реализована методика косвенных измерений (МИ) «Методика измерений и пересчета температуры, полученной от ладоней, в температуру подмышечной впадины». Методика аттестована и зарегистрирована Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). МИ № 7780 внесена в реестр Росстандарта «Аттестованные методики (методы) измерений» под № ФР.1.32.2024.47935, номер свидетельства об аттестации 2207/2411-(RA.RU.310494)-2023 от 27.12.2023 г.

С использованием методики разработано специальное программное обеспечение (СПО) «Оценка функционального состояния». СПО зарегистрировано Федеральной службой по интеллектуальной собственности (Роспатент) и внесено в реестр программ для ЭВМ. Номер свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ – 2024612210 от 29.01.2024 г. Разработанное в соответствии с методикой СПО используется в программно-аппаратном комплексе, предназначенном для проведения предсменных медицинских осмотров.

Список литературы

1. Sund-Levander M., Forsberg C., Wahren L. K. Normal oral, rectal, tympanic and axillary body temperature in adult men and women: a systematic literature review // *Scandinavian Journal of Caring Sciences*. 2002. N 16(2). P. 122–128. <https://doi.org/10.1046/j.1471-6712.2002.00069.x>
2. Физиология человека. Атлас динамических систем / К. В. Судаков, В. В. Андрианов, Ю. Е. Вагин, И. И. Киселев; под редакцией академика РАМН К. В. Судакова. 2-е изд. М.: ГЭОТАР-Медиа; 2018. 416 с.
3. Kuht J., Farmery A. D. Body temperature and its regulation // *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*. 2021. N 22(10). P. 657–662. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2021.07.004>
4. FeverPhone: Accessible Core-Body Temperature Sensing for Fever Monitoring Using Commodity Smartphones / J. Breda, M. Springston, A. Mariakakis, S. Patel // *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*. 2023. N 7(1). P. 1–23. <https://doi.org/10.1145/3580850>
5. Lenhardt R., Sessler D. Estimation of Mean-body Temperature From Mean-skin and Core Temperature // *Anesthesiology*. 2007. N 105(6). P. 1117–1121. <https://doi.org/10.1097/00005542-200612000-00011>
6. Ураков А. Л., Касаткин А. А., Уракова Н. А. Инфракрасная термография пальцев и ладоней при шоке как способ оценки устойчивости пациентов к гипоксии и «отзывчивости» их к оживлению // *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2013. № 4(44). С. 169–171. EDN RPTIQT
7. Взаимосвязь колебаний температуры и кровотока пальцев рук / Д. А. Усанов, А. А. Сагайдачный, А. В. Скрипаль, А. В. Фомин // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2012. № 2(42). С. 37–42. EDN PACULL
8. Skin and core temperature response to partial- and whole- body heating and cooling / C. Huizenga, H. Zhang, E. Arens, D. Wang // *Journal of Thermal Biology*. 2004. N 29(7-8). P. 549–558. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2004.08.024>
9. Michael K., Garcia-Souto M. D. P., Dabnichki P. An investigation of the suitability of Artificial Neural Networks for the prediction of core and local skin temperatures when trained with a large and gender-balanced database // *Applied Soft Computing*. 2017. N 50. P. 327–343. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.11.006>
10. Estimation of core body temperature from skin temperature, heat flux, and heart rate using a Kalman filter / A. P. Welles, X. Xu, W. R. Santee, D. P. Looney, M. J. Buller, A. W. Potter, R. W. Hoyt // *Computers in Biology and Medicine*. 2018. N 99(2). P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2018.05.021>
11. Prediction of Core Body Temperature Based on Skin Temperature, Heat Flux, and Heart Rate Under Different Exercise and Clothing Conditions in the Heat in Young Adult Males /

P. Eggenberger, B. A. MacRae, S. Kemp, M. Bürgisser, R. M. Rossi, S. Annaheim // *Frontiers in Physiology*. 2018. N 9(1780). P. 1–11. <http://doi.org/10.3389/fphys.2018.01780>

12. Estimation of human core temperature from sequential heart rate observations / M. J. Buller, W. J. Tharion, S. N. Cheuvront, S. J. Montain, R. W. Kenefick, J. Castellani, W. A. Latzka, W. S. Roberts, M. Richter, O. C. Jenkins, R. W. Hoyt // *Physiological Measurement*. 2013. N 34(7). P. 781–798. <http://doi.org/10.1088/0967-3334/34/7/781>

13. Estimating Resting Core Temperature Using Heart Rate / D. P. Looney, M. J. Buller, A. V. Gribok, J. L. Leger, A. W. Potter, W. V. Rumlper, W. J. Tharion, A. P. Welles, K. E. Friedl, R. W. Hoyt // *Journal for the Measurement of Physical Behaviour*. 2018. N 1(2). P. 1–7. <http://doi.org/10.1123/jmpb.2017-0003>

14. Сепрано Л. Г. Грокаем машинное обучение. СПб.: Питер; 2024. 512 с.

15. Breiman L. Random Forests // *Machine Learning*. 2001. N 45(1). P. 5–32. <http://doi.org/10.1023/A:1010950718922>

16. Friedman J. H. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine // *The Annals of Statistics*. 2001. N 29(5). P. 1189–1232. <http://doi.org/10.1214/aos/1013203451>

17. Boosting Algorithms as Gradient Descent in Function Space / L. Mason, J. Baxter, P. Bartlett, M. Frean. URL: https://www.researchgate.net/publication/2750572_Boosting_Algorithms_as_Gradient_Descent_in_Function_Space (дата обращения: 19.03.2025).

Reference

1. Sund-Levander M., Forsberg C., Wahren L.K. Normal oral, rectal, tympanic and axillary body temperature in adult men and women: a systematic literature review. *Scandinavian Journal of Caring Sciences*. 2002;16(2):122–128. <https://doi.org/10.1046/j.1471-6712.2002.00069.x>

2. Sudakov K.V., Andrianov V.V., Vagin Yu.E., Kiselev I.I. Human physiology. Atlas of dynamic systems. 2nd ed. Moscow: GEOTAR-Media; 2018. 416 p. (In Russ.)

3. Kuht J., Farmery A.D. Body temperature and its regulation. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*. 2021;22(10):657–662. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2021.07.004>

4. Breda J., Springston M., Mariakakis A., Patel S. FeverPhone: Accessible Core-Body Temperature Sensing for Fever Monitoring Using Commodity Smartphones. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*. 2023;(7):1–23. <https://doi.org/10.1145/3580850>

5. Lenhardt R., Sessler D. Estimation of Mean-body Temperature From Mean-skin and Core Temperature. *Anesthesiology*. 2007;(105):1117–1121. <https://doi.org/10.1097/00000542-200612000-00011>

6. Urakov A.L., Kasatkin A.A., Urakova N.A. Infrared thermography of fingers and palms during shock as a way to assess patients' resistance to hypoxia and "recall" of their survival.

Vestnik Rossiiskoi voenno-meditsinskoi akademii = Bulletin of the Russian Military Medical Academy. 2013;(4):169–171. (In Russ.) EDN RPTIQT

7. Usanov D.A., Sagaidachnyi A.A., Skripal' A.V., Fomin A.V. Relationship between temperature fluctuations and blood flow in the fingers. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulyatsiya = Regional blood circulation and microcirculation*. 2012;(2):37–42. (In Russ.) EDN PACULL

8. Huizenga C., Zhang H., Arens E., Wang D. Skin and core temperature response to partial- and whole- body heating and cooling. *Journal of Thermal Biology*. 2004; (29):549–558. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2004.08.024>

9. Michael K., Garcia-Souto M.D.P., Dabnichki P. An investigation of the suitability of Artificial Neural Networks for the prediction of core and local skin temperatures when trained with a large and gender-balanced database. *Applied Soft Computing*. 2017;(50):327–343. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.11.006>

10. Welles A.P., Xu X., Santee W.R., Looney D.P., Buller M.J., Potter A.W., Hoyt R.W. Estimation of core body temperature from skin temperature, heat flux, and heart rate using a Kalman filter. *Computers in Biology and Medicine*. 2018;(99):1–6. <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2018.05.021>

11. Eggenberger P., MacRae B.A., Kemp S., Bürgisser M., Rossi R.M., Annaheim S. Prediction of Core Body Temperature Based on Skin Temperature, Heat Flux, and Heart Rate Under Different Exercise and Clothing Conditions in the Heat in Young Adult Males. *Frontiers in Physiology*. 2018;(9):1–11. <http://doi.org/10.3389/fphys.2018.01780>

12. Buller M.J., Tharion W.J., Cheuvront S.N., Montain S.J., Kenefick R.W., Castellani J., Latzka W.A., Roberts W.S., Richter M., Jenkins O.C., Hoyt R.W. Estimation of human core temperature from sequential heart rate observations. *Physiological Measurement*. 2013;(34):781–798. <http://doi.org/10.1088/0967-3334/34/7/781>

13. Looney D.P., Buller M.J., Gribok A.V., Leger J.L., Potter A.W., Rumpler W.V., Tharion W.J., Welles A.P., Friedl K.E., Hoyt R.W. Estimating Resting Core Temperature Using Heart Rate. *Journal for the Measurement of Physical Behaviour*. 2018;(1):1–7. <http://doi.org/10.1123/jmpb.2017-0003>

14. Serrano L.G. Grokking Machine Learning. Saint Petersburg: Piter; 2024. 512 p. (In Russ.)

15. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*. 2001;(45):5–32. <http://doi.org/10.1023/A:1010950718922>

16. Friedman J.H. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. *The Annals of Statistics*. 2001;(29):1189–1232. <http://doi.org/10.1214/aos/1013203451>

17. Mason L., Baxter J., Bartlett P., Frean M. Boosting Algorithms as Gradient Descent in Function Space. Available at: https://www.researchgate.net/publication/2750572_Boosting_Algorithms_as_Gradient_Descent_in_Function_Space (accessed 19.03.2025).

Информация об авторах / Information about the Authors

Вячеслав Викторович Савченко, аспирант,
Всероссийский научно-исследовательский
институт метрологии имени Д. И. Менделеева,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: sav4enk0@mail.ru,
ORCID: 0009-0002-6130-2486

Vyacheslav V. Savchenko, Post-Graduate
Student, D.I. Mendeleev Institute for Metrology,
St. Petersburg, Russian Federation,
e-mail: sav4enk0@mail.ru,
ORCID: 0009-0002-6130-2486

Владимир Александрович Сясько,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры теоретической
и прикладной метрологии, Всероссийский
научно-исследовательский институт
метрологии имени Д. И. Менделеева,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: 9334343@gmail.com,
ORCID: 0000-0002-8599-9698

Vladimir A. Syasko, Doctor of Sciences
(Engineering), Associate Professor, Professor
of the Department Theoretical and Applied
Metrology, D.I. Mendeleev Institute for Metrology,
St. Petersburg, Russian Federation,
e-mail: 9334343@gmail.com,
ORCID: 0000-0002-8599-9698

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-153-168>



УДК 004.052

Метод управления бригадами машин службы скорой медицинской помощи на основе использования геоинформационных систем

Е. А. Коломиец¹ ✉, Т. И. Лапина¹

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

✉ e-mail: lenus07@yandex.ru

Резюме

Цель исследования – разработать метод управления бригадами машин службы скорой медицинской помощи на основе оптимизации планирования маршрута движения бригад с использованием геоинформационных систем.

Методы. Рассматриваются перспективы интеграции геоинформационных систем и геоинформационных технологий в систему управления транспортными потоками автомобилей скорой помощи. Этот подход предполагает создание оптимизированных маршрутов, минимизирующих время реагирования на экстренные вызовы и повышающих эффективность доставки пациентов в медицинские учреждения.

В контексте долгосрочной стратегии развития информационно-коммуникационных технологий в Российской Федерации особое внимание уделяется формированию современной информационной и телекоммуникационной инфраструктуры, а также разработке автоматизированных информационных систем, ГИС и ГИТ. Данные технологии направлены на создание высококачественных инновационных услуг и продуктов, которые могут быть эффективно интегрированы в социальные и медицинские системы.

Для решения этой проблемы проводится анализ различных источников исходной информации, включая данные о дорожной загруженности, статических и динамических параметрах транспортной инфраструктуры. Использование ГИС и ГИТ позволяет интегрировать и анализировать эти данные в реальном времени, обеспечивая высокую точность и оперативность принимаемых решений.

Результаты. Представленный метод управления бригадами скорой медицинской помощи основан на усовершенствованной версии эстафетного метода, что позволяет значительно повысить эффективность планирования маршрутов. В процессе работы с геопространственными данными осуществляется оптимизация маршрутов путем исключения тупиковых узлов, что существенно сокращает количество вычислений и, как следствие, минимизирует временные затраты на планирование.

Заключение. Использование ГИС в транспортных системах открывает значительные возможности для повышения эффективности оперативного принятия решений для ССМП.

Ключевые слова: геоинформационная система; пространственные данные; управление объектами; автоматизированная обработка; оптимальный маршрут.

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

Для цитирования: Коломиец Е.А., Лапина Т.И. Метод управления бригадами машин службы скорой медицинской помощи на основе использования геоинформационных систем // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 2. С. 153–168. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-153-168>

Поступила в редакцию 18.04.2025

Подписана в печать 15.05.2025

Опубликована 30.06.2025

A method of managing ambulance crews based on the use of geographic information systems

Elena A. Kolomiets¹ ✉, Tatyana I. Lapina

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

✉ e-mail: lenus07@yandex.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop a method for managing ambulance crews based on optimizing the planning of the route of the crews using geographic information systems.

Methods. The possibilities of using geoinformation systems to optimize the routes of ambulances are being considered. One of the priorities for the development of information and communication technologies in Russia in the long term is the formation of modern information and telecommunications infrastructure, automated information systems (AIS), geographic information systems (GIS) and geographic information technologies (GIT) and the provision of high-quality innovative services and products based on them, ensuring the effective application of their results in social facilities. Geoinformation systems and technologies (GIS technologies) are a powerful tool for visualizing geographically distributed information and subsequent decision-making on the planning of the route of vehicles (TS). A typical structural and functional organization of receiving calls from emergency medical services (SSMP) is given.

The problem of waiting for ambulances for patients and delivering them to medical institutions in general, especially during a pandemic, is urgent and needs to be addressed. The sources of initial heterogeneous information in the geospatial information support of the SSMP are given, on the basis of which traffic congestion is determined and static and dynamic parameters are identified.

Results. A method for managing SSMP teams has been developed, which includes the search for the shortest path, characterized by a modification of the relay method, which consists in processing geospatial data and removing dead ends, which reduces the number of calculations when planning routes.

Conclusion. The use of GIS in transport systems opens up significant opportunities for improving the efficiency of operational decision-making for SSMP.

Keywords: geoinformation system; spatial data; object management; automated processing; the optimal route.

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

For citation: Kolomiets E.A., Lapina T.I. A method of managing ambulance crews based on the use of geographic information systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2025;15(2):153–168. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-153-168>

Received 18.04.2025

Accepted 15.05.2025

Published 30.06.2025

Введение

Внедрение технологий интеллектуального транспорта изменило методы управления городским движением, предлагая динамичные решения для уменьшения заторов, повышения безопасности и оптимизации использования ресурсов. По этой причине дорожные заторы становятся основной проблемой для экспертов по планированию дорожного движения и городских менеджеров, которые должны отслеживать и понимать основные причины дорожных заторов для определения решений [1]. Транспортные заторы преследуют современные города, и справиться с их постоянно меняющимся характером является постоянной проблемой [2].

В работе [3] обсуждается использование интеллектуальных транспортных систем (ИТС) для прогнозирования транспортного потока и скорости, а также классификации различных дорожных ситуаций. В нем подчеркивается важность понимания структуры трафика и принятия обоснованных решений для эффективного управления трафиком. Целью исследования является изучение самых современных методов, используемых в ИТС для прогнозирования и классификации трафика, что указывает на акцент на прогнозировании будущих условий дорожного движения. Кроме того, в нем упоминается изучение методов предварительной обработки и оценки показателей, которые являются

важнейшими аспектами точности прогнозирования и оценки эффективности.

Основные методы и инструменты ГИС в управлении транспортом рассмотрены в работе [4]. К таким методам относятся:

- географический (пространственный) анализ использования транспортных систем и перевозок, который используется для анализа пространственных данных, таких как карты дорог, расположение остановок общественного транспорта, плотность населения и т. д.;

- маршрутизация и планирование, при котором ГИС позволяет оптимизировать планирование маршрута с учетом различных факторов, которые могут включать в себя такие факторы, как трафик, расстояние, время, стоимость транспортировки;

- управление дорожным движением, в котором используются данные о дорожном движении, собранные с камер, датчиков и GPS, с помощью которых можно успешно создавать цифровые динамические модели дорожного движения и прогнозы транспортных потоков на основе информации о дорожном движении в режиме реального времени;

- визуализация и мониторинг, позволяющий визуализировать географическую информацию на картах, что упрощает понимание и принятие решений;

- анализ окружающей среды, позволяющий анализировать социально-

экономические и экологические факторы, влияющие на транспортную систему [5].

В работе [6] рассматривается использование ГИС-технологий как инструмента, позволяющего повысить скорость реагирования различных ведомств пропускную способность при ликвидации чрезвычайных ситуаций за счёт точного определения места происшествия и ресурсов для ликвидации.

Ключевым аспектом успеха является способность мгновенно контролировать транспортный поток и делать обоснованный выбор с учетом меняющихся факторов окружающей среды и потребностей пользователей [7]. Однако сложность современных транспортных сетей создает значительные проблемы для достижения плавного управления и принятия решений [8]. С помощью ГИС создаются интерактивные карты, графики для наглядного представления данных о движении транспортных средств. Предоставление инструментов для анализа и оценки различных вариантов маршрутов позволяет принимать более обоснованные решения [9].

Планирование маршрутов играет важнейшую роль в решении многих проблем, с которыми сталкиваются городские транспортные системы. Определяя наиболее эффективные маршруты для транспортных средств, планирование маршрутов направлено на минимизацию времени в пути, снижение расхода топлива и уменьшение заторов на дорогах [10]. Эффективное планирование

маршрутов – это не просто выбор самого быстрого или короткого маршрута; оно также учитывает такие факторы, как условия дорожного движения в реальном времени, перекрытие дорог, аварии и спрос со стороны пользователей. Оптимизация этих маршрутов может повысить эффективность сети, позволяя лучше распределять ресурсы, сокращать задержки и повышать удобство поездок. Кроме того, планирование маршрутов тесно связано с общей эффективностью транспортной системы, поскольку неэффективность в одной области может иметь каскадный эффект по всей сети [11].

Особо остро эта проблема проявляется при оперативном принятии решений о планировании маршрута движения бригад служб скорой медицинской помощи (ССМП) [12].

Материалы и методы

В настоящее время существуют такие специализированные системы управления, как АДИС, МИСС 03, «Скорая помощь» и др., обеспечивающие оптимизацию принятия решений для ССМП относительно максимального сокращения времени реагирования на вызовы.

Для обеспечения эффективного управления и функционирования работы ССМП в регионе используется автоматизированная система управления «Скорая помощь». Рассмотрим основные задачи, решаемые АСУ:

1. Учет входящих вызовов:

- автоматическое начало отсчёта времени с момента поступления вызова;
- фиксация времени приёма и регистрации вызова в системе.

2. Регистрация входящих вызовов:

- автоматическое начало отсчёта времени с момента поступления вызова;
- фиксация времени приёма и регистрации вызова в системе.

3. Распределение вызовов и определение приоритета:

- определение времени установления приоритета вызова;
- регистрация времени распределения вызова между бригадами.

4. Оперативный приём вызовов в режиме реального времени:

- мониторинг времени поступления вызовов и их последовательности;
- фиксация времени начала реагирования на вызовы с высоким приоритетом.

5. Передача информации в службы экстренного реагирования:

- регистрация времени передачи информации о вызовах в соответствующие службы;
- фиксация времени начала координации действий между службами скорой медицинской помощи и другими службами [13].

Обработка вызовов осуществляется следующим образом:

1. Определение тип вызова (например, «Первичный», «Повторный», «Скорая неотложная помощь» и т. д.).

2. Заполнение контрольный талон, указав регистрационные данные пациента.

3. Передача информации диспетчеру на подстанцию, которая отвечает за район, где находится пациент.

4. Проверка, есть ли свободные бригады на подстанции, которые могут вернуться, и, если возможно, бригады, которые могут обслужить вызов по пути.

5. Отслеживание текущего состояния бригад и вызовов и контроль их изменения.

6. После прибытия фельдшер должен заполнить все поля результатов осмотра в мобильном приложении, после чего информация передается на подстанцию и определяются профильное ЛПУ [14].

На рисунке 1 представлена визуальная схема, которая наглядно показывает структуру и функции системы приёма вызовов.

Остановимся подробнее на блоке «Выезд бригады и определение маршрута», а именно на определении оптимального маршрута движения машины ССМП. В настоящее время пробки на дорогах стали серьезной проблемой, особенно остро это влияет на своевременное прибытие бригад ССМП на место вызова и оперативную доставку больных в профильные лечебно-профилактические учреждения (ЛПУ).

В работе [15] рассматриваются анализ и обработка графической информации, требующей оперирования с огромным объемом информации, и значительное время для выполнения анализа.

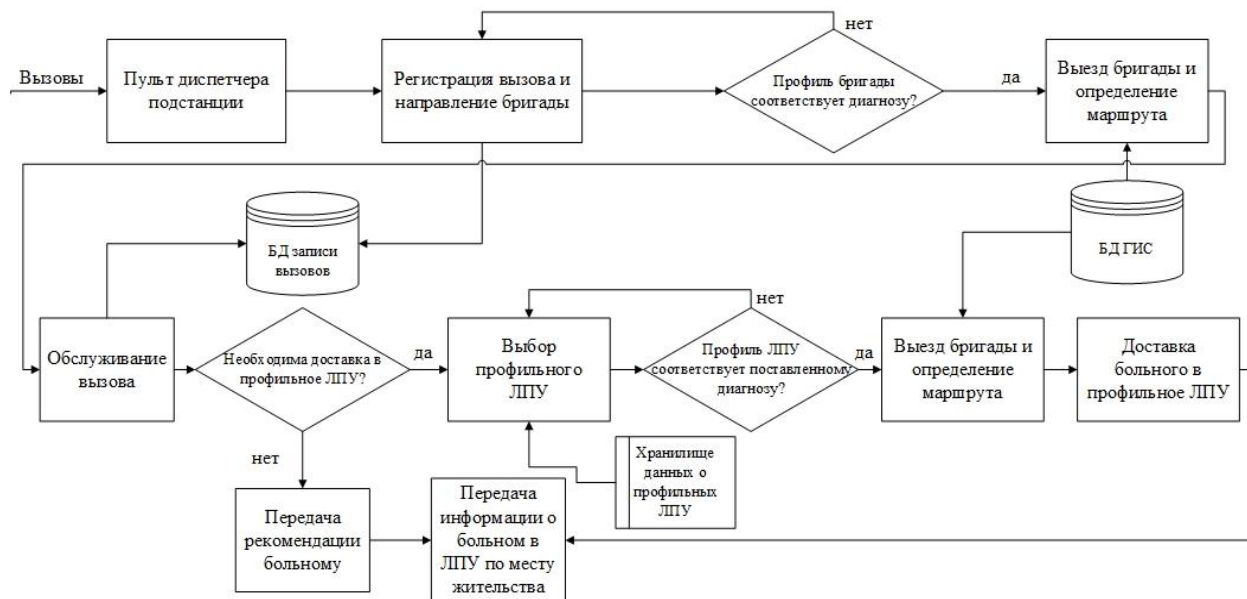


Рис. 1. Структура и функции обработки вызовов

Fig. 1. Call handling structure and functions

В рамках АСУ «Скорая помощь» осуществляется обработка геопространственных данных с использованием электронных картографических платформ. На этих картах, основанных на координатной привязке, визуализируются места вызовов, текущее расположение медицинских бригад и оптимальные маршруты их перемещения к местам происшествий.

Система мониторинга предоставляет пользователям возможность в реальном времени отслеживать ключевые показатели эффективности работы службы скорой помощи. Графическое представление данных в виде диаграмм на карте позволяет оперативно оценивать следующие параметры:

- количество обслуженных вызовов, что является индикатором объема выполненной работы и загруженности службы;

- количество свободных бригад, что критически важно для оперативного реагирования на вызовы и поддержания необходимого уровня готовности к чрезвычайным ситуациям;

- количество вызовов, находящихся в очереди на обслуживание, что позволяет оценить эффективность распределения ресурсов и выявить возможные узкие места в системе;

- количество обслуженных вызовов за смену, что является интегральным показателем производительности и эффективности работы медицинского персонала [16].

Таким образом, внедрение данной системы мониторинга значительно повышает уровень управления ресурсами и оперативность реагирования службы скорой помощи, способствуя более эффективному оказанию медицинской помощи населению.

Для того чтобы минимизировать время прибытия бригад скорой медицинской помощи на место вызова и время транспортировки пациента в профильное лечебное учреждение, можно использовать модифицированный эстафетный метод построения кратчайшего пути.

В основе предложенного подхода лежит теория графов, позволяющая формализовать и решить задачу нахождения оптимального маршрута от станции СМП до места нахождения пациента.

Ключевым элементом метода является концепция «эстафеты», при которой информация о загруженности транспортных путей в определённой локации становится доступной по мере прохождения маршрута предшествующими бригадами. Это позволяет адаптировать последующие маршруты с учётом текущих условий, минимизируя время отклика системы.

Процесс начинается с одновременного старта всех бригад из начальной точки (местоположение станции СМП), при этом скорость их движения принимается за единицу. На основе анализа загруженности участков пути формируется маршрут с минимальной транспортной нагрузкой, что обеспечивает наиболее эффективное использование ресурсов и сокращает время прибытия на место вызова. При первом же совпадении загруженность определяется как

$$Z_{k,j_1} = Z(\mu_{k,j_1}, L_{k,j_1}) = c_{k,j_1},$$

где μ_{kj1} – маршрут движения.

В случае если конечная точка маршрута не совпадает с текущим местоположением пациента, система не может корректно определить оптимальный путь. В данной ситуации необходимо инициировать повторное распределение ресурсов. Для этого формируется новая группа специалистов, которая начинает движение из точки A_{j1} , охватывая все оставшиеся узлы в системе. Данный метод обеспечивает динамическую адаптацию к изменяющимся условиям и минимизирует вероятность возникновения маршрутов с тупиковыми ситуациями.

В данном контексте T_{j1}^c представляет собой временной интервал, затраченный лидером предыдущей группы на достижение точки A_{j1} . Параметр $c_{j1,j2}$ отражает время, необходимое для перемещения между точками A_{j1} и A_{j2} . Общее время T_{j2} включает в себя не только время, затраченное на путь от начальной точки предыдущей группы до начальной точки текущей группы, но и временной интервал, необходимый для достижения пункта A_{j2} . Таким образом, $T_{j2} = T_{j1} + c_{j1,j2}$ интегрирует в себя суммарное время, необходимое для выполнения указанных этапов движения, что позволяет комплексно оценить эффективность перемещения бригады, а кратчайший путь находится как

$$\mu_{k,j2}^0 = \mu_{k,j1}^0 \cup \mu_{j1,j2}^0.$$

В случае если граничная вершина идентична целевой, процесс поиска считается завершённым. В противном случае итеративный цикл продолжается до

выполнения условия $j_t = l$. Множество кратчайших путей формируется на основе их загруженности, что существенно оптимизирует алгоритм поиска.

Данный подход исключает необходимость генерации полного множества маршрутов, что значительно повышает эффективность метода. Процесс может быть остановлен при обнаружении конечной дуги, непосредственно ведущей в целевую вершину (A_l).

Оптимальный маршрут определяется как интегрированная траектория перемещения груза между исходным пунктом А и целевым пунктом В, которая минимизирует совокупные затраты, включающие временные издержки на транспортировку, расход топлива специализированными транспортными средствами и прочие сопутствующие расходы [17]. В рамках данного исследования издержки рассматриваются в контексте комплексного анализа, учитывающего не только временные параметры, но и экономические аспекты эксплуатации транспортных средств, а также экологические и эксплуатационные факторы [18].

На загруженность участка пути (улицы) огромное влияние оказывают заторы на дорогах [19]. Основные факторы, способствующие заторам на дорогах, можно разделить на две категории – перегрузка сети и нарушения дорожного движения. Нарушения дорожного движения являются временными явлениями и влияют на дорожное движение только по мере их возникновения. Это связано

с авариями, дорожно-строительными работами и суровыми погодными условиями. Авария может привести к перекрытию дороги или замедлению движения транспорта, поскольку водители пытаются понять, что происходит. Аналогичным образом плохие погодные условия могут заставить водителей снизить скорость, поскольку они беспокоятся о своей безопасности. Кроме того, дорожное строительство может привести к сокращению количества полос движения, что вынудит водителей тесниться на свободных полосах. Таким образом, эти причины могут значительно увеличить заторы на дорогах, но из-за их случайности мало что можно сделать для предотвращения подобных инцидентов, принимая во внимание, что при перегрузке сети все случаи заторов на дорогах вызваны либо снижением пропускной способности дорог, либо повышенным спросом на транспорт. Другими словами, существует два типа факторов, способствующих перегрузке сети, которые включают факторы предложения и факторы увеличения спроса. Начиная с физических факторов, наибольший вклад в эту категорию вносят узкие места.

Узкие места – это суженные дороги, которые приводят к увеличению заторов, когда спрос на транспортные средства превышает предложение. В зависимости от структуры дорог существует несколько типов узких мест. Узкое место при крупномасштабном слиянии возникает, когда к существующей дороге присоединяется дополнительная

линия; узкое место при сокращении полосы движения возникает, когда количество полос уменьшается, что приводит к слиянию двух или более полос в одну; узкое место при коротком переплетении возникает, когда к дороге добавляется одна линия, в то время как другая удаляется.

Перекрестки городских дорог являются еще одним физическим фактором, вызывающим дорожные заторы. Это факт оказывает существенное влияние на задержки движения, потому что на перекрестке потоки транспортных средств с разных подъездов, совершающие либо правый поворот, либо сквозной, либо левый, стремятся занять одно и то же физическое пространство в одно и то же время. В дополнение к автомобильным потокам некоторым пешеходам требуется пространство для перехода улиц, что еще больше усугубляет ситуацию. Наличие большегрузных транспортных средств можно считать третьим физическим фактором, приводящим к задержкам на дорогах. Из-за большого количества остановок, на которых автобусы должны останавливаться в своей повседневной работе, для автобусов нет выделенных полос, что задерживает другие транспортные средства на той же полосе и вызывает заторы на дорогах. Также на пропускную способность влияют параметры движения транспортных потоков на нерегулируемых примыканиях в городских условиях, рассмотренные в работе [20], на

основе методов проведения исследования, объектов наблюдения, условий проведения исследований, определение интенсивности движения по направлениям движения на нерегулируемых примыканиях, определение интервалов автомобилей, определение граничных интервалов.

Максимальная практическая пропускная способность участка пути $C_{ij\max}$ представляет собой предельно возможное количество автотранспортных средств, которое может быть транспортировано по данному сегменту дорожной инфраструктуры в течение одного часа при идеальных эксплуатационных условиях [21]. Пропускная способность измеряется в единицах «автомобилей в час» (авт./ч), является ключевым индикатором эффективности транспортного потока на данном участке и находится как

$$C_{i,j} = \beta C_{i,j} \max .$$

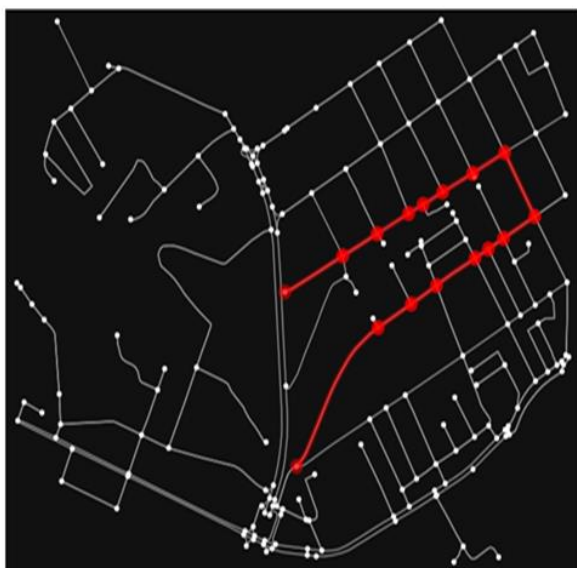
Итоговый коэффициент снижения пропускной способности β служит интегральным показателем, который количественно отражает совокупное уменьшение пропускной способности участка дороги вследствие воздействия различных дестабилизирующих факторов [22]. Данный коэффициент может быть представлен в виде суммы частных коэффициентов, каждый из которых учитывает влияние конкретного фактора на транспортную проходимость: $\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \dots + \beta_n$.

Для более детального анализа и понимания механизмов, влияющих на пропускную способность транспортной инфраструктуры, необходимо рассмотреть ключевые факторы, такие как интенсивность транспортного потока, состояние дорожного покрытия, наличие и конфигурацию перекрёстков, эффективность работы светофорных систем, а также метеорологические условия.

Исследование этих факторов и разработка методов их количественной

оценки позволяют создать более точные модели прогнозирования транспортных потоков и оптимизировать управление дорожным движением. Это, в свою очередь, способствует повышению общей эффективности транспортной системы и снижению негативного воздействия на окружающую среду.

На рисунках 2, а и 2, б отображены оптимальные маршруты движения бригад с учетом загруженности автомобильных дорог.



а



б

Рис. 2. Оптимальные маршруты движения: а – от станции ССМП до места вызова; б – от места вызова до профильного лечебного учреждения

Fig. 2. Optimal driving routes: а – from the SSMP station to the place of call; б – from the place of call to the specialized medical institution

Результаты и их обсуждение

Модифицированный эстафетный метод управления бригадами скорой медицинской помощи (ССМП), основанный на обработке геопространственных данных и анализе загруженности автомобильных дорог, обеспечивает:

1. Поиск кратчайшего пути:

- анализ географических данных для выявления оптимальных маршрутов;
- применение алгоритмов оптимизации для нахождения кратчайших маршрутов с учетом текущих дорожных условий.

2. Удаление тупиковых вершин:

- исключение из маршрута участков, которые не могут быть преодолены;
- оптимизация траектории движения для минимизации временных и ресурсных затрат.

3. Учет загруженности дорог:

- мониторинг текущего состояния транспортного потока в реальном времени;
- корректировка маршрутов с учетом актуальной дорожной ситуации.

Эти меры позволяют сократить объем вычислительных операций при планировании маршрутов и минимизировать время, затрачиваемое на перемещение машин бригад ССМП, что, в свою очередь, повышает эффективность и оперативность оказания медицинской помощи.

Выводы

Для усовершенствования построения оптимальных маршрутов существует необходимость в новых технологиях, к которым относятся передовые технологии зондирования, передовые системы слежения, передовые системы светофоров и расширенное видео обнаружения транспортных средств. Интеллектуальная транспортная система нуждается в усовершенствованной системе слежения по сравнению с современными трекерами. Усовершенствованная система слежения должна иметь датчики для определения как местоположения, так и количества находящихся поблизости транспортных средств. Эти датчики должны быть подключены как к транспортным средствам, так и к сигналам для организации дорожного движения.

Список литературы

1. Trends in Vehicle Re-Identification Past, Present, and Future: A Comprehensive Review / J. Zakria Deng, Y. Hao, M. S. Khokhar, R. Kumar, J. Cai, J. Kumar, M. U. Aftab // *Mathematics*. 2021. Vol. 9, is. 24. P. 3162. <https://doi.org/10.3390/math9243162>
2. Visual Cause Analytics for Traffic Congestion / M. Pi, H. Yeon, H. Son, Y. Jang // *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2021. Vol. 27(3). P. 2186–2201. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2019.2940580>
3. Gomes B., Coelho J., Aidos H. A survey on traffic flow prediction and classification // *Intelligent Systems with Applications*. 2023. Vol. 20. P. 200268. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2023.200268>
4. Pluzhnikova N. Modern geoinformation technologies and their use in transport management // *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 471. P. 1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447106001>
5. The Application of GIS Technology in the Construction of Smart City / L. Yuyan, W. Yanliang, C. Haoyu, W. Zixuan, W., Ziqin C. Yu, L. Guohong // *Academic Journal of Science and Technology*. 2023. Vol. 5. P. 183–186. <https://doi.org/10.54097/ajst.v5i2.6861>

6. Dingqi Z. Research on the Application of Geographic Information Systems in the Construction of Smart Cities // *Advances in Economics, Management and Political Sciences*. 2024. Vol. 96. P. 81–87. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/96/2024MUR0112>
7. Artificial Intelligence in Logistics and Distribution: The function of AI in dynamic route planning for transportation, including self-driving trucks and drone delivery systems / O. Erumusele, O. Tunde, A. Godwin, O. Akintunde, E. Joseph // *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2025. Vol. 25. P. 155–167. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2025.25.2.0214>
8. Zukhurov Y., Sultonov Sh. The use of geographic information systems in modern cartography // *Universum: технические науки*. 2022. N 11(104). P. 52–55.
9. Касаткина Е. В., Кетова К. В. Компьютерное моделирование потоков в городской транспортной сети // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2021. Т. 19, № 1. С. 89–99.
10. Yang W., Xiaoxiang L. Application of Reinforcement Learning Methods Combining Graph Neural Networks and Self-Attention Mechanisms in Supply Chain Route Optimization // *Sensors*. 2025. Vol. 25(3). P. 955. <https://doi.org/10.3390/s25030955>
11. Sokolov N., Shalamova O., Kochergin V. Optimization of urban agglomeration transport flows // *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 471. P. 1–10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447104025>
12. Atsuo N., Masaharu O. Assessing the Effect of a Pandemic on Emergency Medical Service Response Times and Interventions for Out-of-Hospital Cardiac Arrest // *Cureus*. 2024. Vol. 16. P. 1–9. <https://doi.org/10.7759/cureus.75736>
13. Курмангулов А. А., Кононыхин А. А., Брынза Н. С. Проблемы стандартизации систем информирования медицинских организаций Российской Федерации (обзор) // *Проблемы стандартизации в здравоохранении*. 2021. № 11-12. С. 3–13. <https://doi.org/10.26347/1607-2502202111-12003-013>
14. Зайцев Е. М., Коломиец Е. А., Николаев В. Н. Формализация этапов жизненного цикла создания геоинформационной продукции на научно-производственном предприятии // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2020. Т. 24, № 4. С. 146–165. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-146-165>
15. 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>
16. Николаев В. Н., Зайцев Е. М., Коломиец Е. А. Развитие коллективной инфраструктуры муниципального предприятия в условиях цифровой экономики //

Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Т. 9, № 4. С. 28–36. <https://doi.org/10.31854/2307-1303-2021-9-4-28-36>

17. Савекин Ф. Н., Миронов А. Н., Назаров Р. С. Моделирование обеспечивающих действий на основе математической теории графов // Вестник Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А. В. Хрулева. 2021. № 3(27). С. 119–126.

18. Лапина Т. И., Малыхина В. С., Крупчатников Р. А. Система учета и мониторинга расходов электроэнергии на основе геопространственных данных расположения потребителей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 1. С. 88–103. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-88-103>

19. Михайлова С. С., Халмакишинов Е. А. Алгоритм анализа данных на графовых структурах // Наука и бизнес: пути развития. 2022. № 4(130). С. 25–28.

20. Комарова Т. К., Поспелов П. И., Мартяхин Д. С. Исследование параметров движения транспортных потоков на элементах улично-дорожной сети в городских условиях // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 4(70). С. 285–293. <https://doi.org/10.48612/NewsKSUAE/70.25>

21. Структурно-функциональная организация системы обработки геопространственных данных при управлении бригадами скорой медицинской помощи / Е. А. Коломиец, И. А. Халин, Ю. А. Халин, М. А. Титенко // Естественные и технические науки. 2022. № 7(170). С. 182–184. <https://doi.org/10.25633/ETN.2022.07.12>

22. Кочетов Ю. А., Шамрай Н. Б. Оптимизация размещения и передислокации бригад скорой медицинской помощи // Дискретный анализ и исследование операций. 2021. Т. 28, № 2. С. 5–34. <https://doi.org/10.33048/daio.2021.28.702>

References

1. Zakria Deng J., Hao Y., Khokhar M.S., Kumar R., Cai J., Kumar J., Aftab M.U. Trends in Vehicle Re-Identification Past, Present, and Future: A Comprehensive Review. *Mathematics*. 2021;9:3162. <https://doi.org/10.3390/math9243162>

2. Pi M., Yeon H., Son H., Jang Y. Visual Cause Analytics for Traffic Congestion. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2021;27:2186–2201. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2019.2940580>

3. Gomes B., Coelho J., Aidos H. A survey on traffic flow prediction and classification. *Intelligent Systems with Applications*. 2023;20:200268. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2023.200268>

4. Pluzhnikova N. Modern geoinformation technologies and their use in transport management. *E3S Web of Conferences*. 2024;471:1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447106001>
5. Yuyan L., Yanliang W., Haoyu C., Zixuan W., Ziqin W., Yu C., Guohong L. The Application of GIS Technology in the Construction of Smart City. *Academic Journal of Science and Technology*. 2023;5:183–186. <https://doi.org/10.54097/ajst.v5i2.6861>
6. Dingqi Z. Research on the Application of Geographic Information Systems in the Construction of Smart Cities. *Advances in Economics, Management and Political Sciences*. 2024;96:81–87. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/96/2024MUR0112>
7. Erumusele O., Tunde O., Godwin A., Akintunde O., Joseph E. Artificial Intelligence in Logistics and Distribution: The function of AI in dynamic route planning for transportation, including self-driving trucks and drone delivery systems. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2025;25:155–167. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2025.25.2.0214>
8. Zukhurov Y., Sultonov Sh. The use of geographic information systems in modern cartography. *Universum: Technical Sciences*. 2022;(11):52–55.
9. Kasatkina E.V., Ketova K.V. Computer simulation of flows in the urban transport network. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve = Intelligent Systems in Production*. 2021;19(1):89–99. (In Russ.)
10. Yang W., Xiaoxiang L. Application of Reinforcement Learning Methods Combining Graph Neural Networks and Self-Attention Mechanisms in Supply Chain Route Optimization. *Sensors*. 2025;25:955. <https://doi.org/10.3390/s25030955>
11. Sokolov N., Shalamova O., Kochergin V. Optimization of urban agglomeration transport flows. *E3S Web of Conferences*. 2024;471:1–10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447104025>
12. Atsuo N., Masaharu O. Assessing the Effect of a Pandemic on Emergency Medical Service Response Times and Interventions for Out-of-Hospital Cardiac Arrest. *Cureus*. 2024;16:1–9. <https://doi.org/10.7759/cureus.75736>
13. Kurmangulov A.A., Kononikhin A.A., Brynza N.S. Problems of standardization of information systems of medical organizations of the Russian Federation (review). *Problemy standartizatsii v zdravookhranении = Problems of Standardization in Healthcare*. 2021;(11-12):3–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.26347/1607-2502202111-12003-013>
14. Zaitsev E.M., Kolomiets E.A., Nikolaev V.N. Formalization of the stages of the life cycle of geoinformation products creation at a scientific and production enterprise. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020;24(4):146–165. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-146-165>

15. Lapina T.I., Filist S.A., Kriushina Yu.A., Kriushin E.A. Application of CUDA kernels in information processing tasks in a database using BLAZINGSQL. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2022;12:97–108. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-97-108>

16. Nikolaev V.N., Zaitsev E.M., Kolomiets E.A. Development of the collective infrastructure of a municipal enterprise in the digital economy. *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii = Information technology and telecommunications*. 2021;9(4):28–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.31854/2307-1303-2021-9-4-28-36>

17. Savekin F.N., Mironov A.N., Nazarov R.S. Modeling of supporting actions based on mathematical graph theory. *Vestnik VoЕННОй akademii material'no-tekhnicheskogo obespecheniya im. generala armii A.V. Khruleva = Bulletin of the Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev*. 2021;(3):119–126. (In Russ.)

18. Lapina T.I., Malykhina V.S., Krupchatnikov R.A. A system for accounting and monitoring electricity costs based on geospatial consumer location data. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;14(1):88–103. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-88-103>

19. Mikhailova S.S., Halmakshinov E.A. Algorithm of data analysis on graph structures. *Nauka i biznes: puti razvitiya = Science and Business: Ways of Development*. 2022;(4):25–28. (In Russ.)

20. Komarova T.K., Pospelov P.I., Martyakhin D.S. Investigation of traffic flow parameters on elements of the road network in urban conditions. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = Proceedings of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2024;(4):285–293. (In Russ.) <https://doi.org/10.48612/NewsKSUAE/70.25>

21. Kolomiets E.A., Khalin I.A., Khalin Yu.A., Titenko M.A. Structural and functional organization of the geospatial data processing system for the management of emergency medical teams. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Natural and Technical Sciences*. 2022;(7):182–184. (In Russ.) <https://doi.org/10.25633/ETN.2022.07.12>

22. Kochetov Yu.A., Shamray N.B. Optimization of the deployment and redeployment of emergency medical teams. *Diskretnyi analiz i issledovanie operatsii = Discrete Analysis and Operations Research*. 2021;28(2):5–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.33048/daio.2021.28.702>

Информация об авторах / Information about the Authors

Коломиец Елена Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: lenus07@yandex.ru, ORCID: 0009-0002-6004-4155, Author ID: 862472

Elena A. Kolomiets, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Computer Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: lenus07@yandex.ru, ORCID: 0009-0002-6004-4155, Author ID: 862472

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, Author ID: 2064-6413

Tatyana I. Lapina, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: lapinati@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7959-3053, Author ID: 2064-6413

МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-169-189>



УДК 616-71:519.688

Мобильный многопараметрический программно-аппаратный комплекс мониторинга показателей здоровья человека

К. С. Харланова¹✉, М. О. Ревякина¹, А. В. Селихов¹,
В. М. Донцов¹, В. В. Мишин¹

¹ Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева
ул. Комсомольская, д. 95, г. Орёл 302026, Российская Федерация

✉ e-mail: hks0312@mail.ru

Резюме

Цель исследования – разработка концепции программно-аппаратного комплекса мониторинга функционального состояния человека. Создаваемый комплекс должен быть многоцелевым и универсальным в части возраста пациентов и применимости комплекса в различных сценариях, в том числе для персонального применения пациентами, в условиях реабилитации, для оперативного мониторинга состояния спортсмен-нов, пилотов, водителей и других категорий, включая работающих в экстремальных условиях.

Методы. Приведён сравнительный анализ неинвазивных методов и технических средств получения информации о значимых параметрах функционального состояния организма человека. Выполнено обобщение результатов анализа с целью формирования требований к аппаратным и программным средствам мониторинга функционального состояния человека. Проанализирована математическая модель, позволяющая получить интегральную оценку функционального состояния человека.

Результаты. Выявлены значимые параметры и характеристики организма человека, поддающиеся объективному инструментальному контролю, необходимые для создания программно-аппаратного комплекса, позволяющего в режиме реального времени отслеживать функциональное состояние человека. Определены требования к узлам комплекса, позволяющего оценивать функциональное состояние как с отвлечением, так и без отвлечения объекта контроля от профессиональной деятельности. Сформулирован состав и характеристики каналов измерения. Предложен способ формирования оценки функционального состояния человека, основанный на применении методов искусственного интеллекта.

Заключение. Предлагаемый программно-аппаратный комплекс удовлетворяет поставленным целям и задачам. Проведенное исследование позволяет рекомендовать разрабатываемый комплекс для использования медицинским персоналом с целью поддержки принятия врачебных решений. Разрабатываемый комплекс является многоцелевым и может быть полезен для персонального применения пациентами, в том числе в рамках домашней телемедицины, а также спортсменами, которым необходимо проводить непрерывный мониторинг состояния организма в ходе тренировочного процесса. Комплекс может быть использован людьми, чья профессиональная деятельность связана с рисками в случае снижения функциональных показателей организма.

© Харланова К. С., Ревякина М. О., Селихов А. В., Донцов В. М., Мишин В. В., 2025

Ключевые слова: функциональная диагностика; неинвазивные методы контроля; медицинское приборостроение; телемедицина.

Финансирование. Работа выполнена в ОГУ имени И.С. Тургенева в рамках государственного задания № 075-00196-24-02 на 2024 год и на плановый период 2025 и 2026 годов от 01.04.2024 г., проект № FSGN-2024-0007 (1023110800218-7-3.2.4;3.1.3;2.6.1).

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

Для цитирования: Мобильный многопараметрический программно-аппаратный комплекс мониторинга показателей здоровья человека / К.С. Харланова, М. О. Ревякина, А. В. Селихов, В. М. Донцов, В. В. Мишин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 2. С. 169-189. [https://doi.org/ 10.21869/2223-1536-2025-15-2-169-189](https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-169-189)

Поступила в редакцию 11.04.2025

Подписана в печать 09.05.2025

Опубликована 30.06.2025

Mobile multiparameter hardware and software complex for monitoring human health indicators

Kristina S. Kharlanova ✉, Maria O. Revyakina, Alexey V. Selikhov,
Venedikt M. Dontsov, Vladislav V. Mishin

¹ Orel State University named after I.S. Turgenev
95 Komsomolskaya Str., Oryol 302026, Russian Federation

✉ e-mail: hks0312@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop the concept of a software and hardware complex for monitoring the functional state of a person. The complex being created should be multi-purpose and universal in terms of the age of patients and the applicability of the complex in various scenarios, including for personal use by patients, in rehabilitation, for operational monitoring of the condition of athletes, pilots, drivers and other categories, including those working in extreme conditions.

Methods. A comparative analysis of noninvasive methods and technical means of obtaining information about significant parameters of the functional state of the human body is presented. The results of the analysis are summarized in order to form requirements for hardware and software tools for monitoring the functional state of a person. A mathematical model is analyzed allowed to obtain an integral estimation of the functional state of a person.

Results. Significant parameters and characteristics of the human body amenable to objective instrumental control have been identified. These parameters are necessary to create a software and hardware complex that allows real-time monitoring of the functional state of a person. The requirements for the nodes of the complex are defined. It makes possible to assess the functional state both with and without distraction of the object of control from professional activity. The composition and characteristics of measurement channels are formulated. A method of forming an assessment of a person's functional state based on the use of artificial intelligence methods is proposed.

Conclusion. The proposed hardware and software package satisfies the set goals and objectives. The completed research allows us to recommend the complex being developed for use by medical personnel in order to support medical decision-making. The complex under development is multi-purpose and can be useful for personal use by patients, including in home telemedicine, as well as athletes who need to continuously monitor the body's state during the training process. The complex can be used by people whose professional activity is associated with risks in the event of a decrease in the functional parameters of the body.

Financing: The work was performed at the I.S. Turgenev OSU within the framework of state assignment No. 075-00196-24-02 for 2024 and for the planning period of 2025 and 2026 dated 04/01/2024, project No. FSGN-2024-0007 (1023110800218-7-3.2.4;3.1.3;2.6.1).

Keywords: functional diagnostics; noninvasive control methods; medical instrumentation; telemedicine.

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

For citation: Kharlanova K.S., Revyakina M.O., Selikhov A.V., Dontsov V.M., Mishin V.V. Mobile multiparameter hardware and software complex for monitoring human health indicators. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2025;15(2):169–189. (In Russ.) [https://doi.org/ 10.21869/2223-1536-2025-15-2-169-189](https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-169-189)

Received 11.04.2025

Accepted 09.05.2025

Published 30.06.2025

Введение

Современное общество сталкивается с необходимостью эффективного мониторинга состояния здоровья человека в условиях как обычной жизни, так и при экстремальных физических или эмоциональных нагрузках. С увеличением темпа жизни и ростом числа людей, занимающихся спортом и другими активностями, возрастает потребность в технологиях, позволяющих в режиме реального времени отслеживать физиологические параметры организма. Это особенно актуально для спортсменов, сотрудников экстремальных профессий, а также для людей с хроническими заболеваниями, требующими постоянного наблюдения [1]. Также остро стоит проблема своевременного оказания медицинской помощи в условиях работы или проживания в местах, удаленных от медицинских центров: деревни, пункты метеорологического наблюдения, вахтовые поселки.

Современное направление телемедицинских исследований позволяет решить данные проблемы, однако, они требуют участие эксперта – врача, который должен вручную обработать результаты анализов. Использование интеллектуальной системы, которая будет автоматически обрабатывать данные,

генерировать рекомендации для назначения лечения врачу, выделяя возможные зоны риска, позволит сократить трудозатраты и повысить эффективность постановки диагноза, позволить отслеживать динамику изменения состояния здоровья [2].

Целью работы является разработка и представление концепции программно-аппаратного комплекса (ПАК) для проведения мониторинга функционального состояния человека.

Для достижения данной цели важными являются определение номенклатуры измеряемых параметров и разработка требований к ПАК.

Материалы и методы

Обязательным диагностическим сигналом при обследовании пациентов является сигнал ЭКГ, так как согласно статистике сердечно-сосудистая заболеваемость занимает лидирующее место среди заболеваний и первое место по смертности [3].

Также суммарно стандартизованный коэффициент смертности (СКС) от сердечно-сосудистых заболеваний и когнитивных нарушений увеличился с $551,4 \pm 84,9$ в 2019 г. до $622,6 \pm 98,5$ на 100 тыс. населения в 2020 г. и снизился в 2021 г. до $612,6 \pm 106$ на 100 тыс.

населения. Однако их доля в смертности от всех причин сократилась почти на 10% ($46,97 \pm 4,6$ в 2021 г. и $55,98 \pm 4,6\%$ в 2019 г.). Рост СКС от года к году отмечен в 30 регионах; в остальных регионах отмечена неустойчивая динамика. Доля кардиологических причин от всех причин составила $30,5 \pm 5,8\%$ в 2019 г., $29,1 \pm 5,7\%$ в 2020 г. и $25,95 \pm 5,56\%$ в 2021 г. [4]. Наибольшие СКС и их доли в структуре смертности приходятся на группу 1 (хроническая ишемическая болезнь сердца (ИБС) – в среднем за 3 года $17,8 \pm 5,8\%$) и группу 6 (причины с нечеткими критериями болезни, но связанные с КН – $13,9 \pm 5,9\%$). Вклад второй (острые формы ИБС – $4,6 \pm 2,8\%$), третьей (пороки, кардиопатии, эндо- и миокардиты – $4,8 \pm 2,7\%$) и пятой (острые нарушения мозгового кровообращения – $6,1 \pm 1,7\%$) групп причин значительно меньше¹. Шестое место по величине СКС и вкладу в смертность от всех причин занимают алкоголь-ассоциированные причины ($1,8 \pm 1,1\%$). Доля других причин (артериальная гипертензия, болезнь Альцгеймера, болезнь Паркинсона, другие психические нарушения) небольшая [5]. Таким образом, актуальным является совместное исследование ЭКГ- и ЭЭГ-сигналов. Данные сигналы являются полными и содержат значительный объем информации для постановки диагноза, однако необходимо применение вспомогательных параметров, дополняющих общую клиническую картину: артериальное давление, частота дыхания, уровень насыщения кислородом капиллярной крови, электрическое сопротивление тканей,

биоэлектрические потенциалы мышц, температура, частота и метод движения глазного яблока, температура [6].

Совокупность данных параметров позволит оценить не только физическое, но и психоэмоциональное состояние, что позволит более полно оценить здоровье человека.

Разработка многопараметрических программно-аппаратных комплексов стала ответом на вызовы современности. Такие системы способны одновременно отслеживать несколько жизненно важных показателей, что позволяет более глубоко анализировать функциональное состояние организма. Мониторинг таких параметров, как сердечный ритм, артериальное давление, температура тела и уровень кислорода в крови, дает возможность не только выявлять отклонения от нормы, но и предсказывать потенциальные риски для здоровья в условиях повышенной нагрузки. Программно-аппаратный комплекс должен соответствовать следующим требованиям:

- возможность автономной автоматической регистрации основных функционально-диагностических показателей человека;

- возможность обработки результатов измерения (мониторинга) параметров, характеризующих основные функционально-диагностические показатели человека;

- способность формирования оценок и результатов обработки сигналов и данных для поддержки принятия врачебных решений.

¹ Клинические рекомендации. Желудочковые нарушения ритма. Желудочковая тахикардия и внезапная сердечная смерть. URL:

http://disuria.ru/_ld/11/1115_kr20I46I47I49MZ.pdf
(дата обращения: 22.03.2025).

Многофункциональный программно-аппаратный комплекс

В данной статье рассматривается концепция многофункционального программно-аппаратного комплекса, предназначенного для мониторинга функционального состояния организма человека в различных условиях. Особое внимание уделяется адаптации системы к экстремальным ситуациям, таким как физические нагрузки, изменение окружающей среды и стрессовые факторы, описание архитектуры, функциональных возможностей и алгоритмов обработки сигналов и больших данных, основные направления исследования.

Программно-аппаратный комплекс автономной автоматической регистрации основных функционально-диагностических показателей человека состоит из девяти комплектов электродов по каналам измерения, измерительного модуля, устройства обработки измерительного сигнала, блока питания, а также периферийных устройств, таких как: телефон, персональный компьютер и т. д. Данные, полученные в результате обследования комплексом, обрабатываются с использованием специализированного программного обеспечения, обеспечивающего сбор, обработку и анализ получаемых данных в реальном времени [7]. Описанные алгоритмы обработки информации позволяют выявлять отклонения от нормы и генерировать рекомендации для пользователя, а также помогают медицинскому персоналу принимать решения при постановке диагноза. Рассмотрим структурную схему программно-аппаратного комплекса автономной автоматической регистрации основных функционально-диагностических показателей человека (рис. 1).

Согласно структурной схеме, комплекты электродов, предназначенные для непосредственного получения сигналов, характеризующих основные функционально-диагностические показатели человека, размещаются на теле пациента. Комплекты содержат электроды по каждому каналу измерения: ЭКГ, ЭЭГ, артериального давления, частоты дыхания и др., а также необходимые соединители и держатели на теле пациента. Входные сигналы с комплекта электродов попадают на модуль измерительный, который предназначен для аналогового преобразования входных сигналов, их фильтрации, дискретизации и квантования. На выходе измерительного модуля формируется цифровой код, который посредством интерфейса передается на последующие модули ПАК.

Модуль обработки измерительной информации предназначен для первичной обработки и хранения полученных сигналов. Взаимодействует с другими элементами аппаратно-программного комплекса посредством типовых интерфейсов. Также осуществляется связь с периферийными устройствами для мобильной или стационарной визуализации данных, связь с удаленным сервером для глубокой обработки сигналов и формирования оценок и результатов обработки с целью поддержки принятия врачебных решений.

Для сетевого питания всех составляющих ПАК используется импульсный блок питания, автономное питание осуществляется от специальных батарей. Периферийные устройства предназначены для предварительной визуализации результатов измерений параметров, характеризующих основные функционально-диагностические показатели человека.

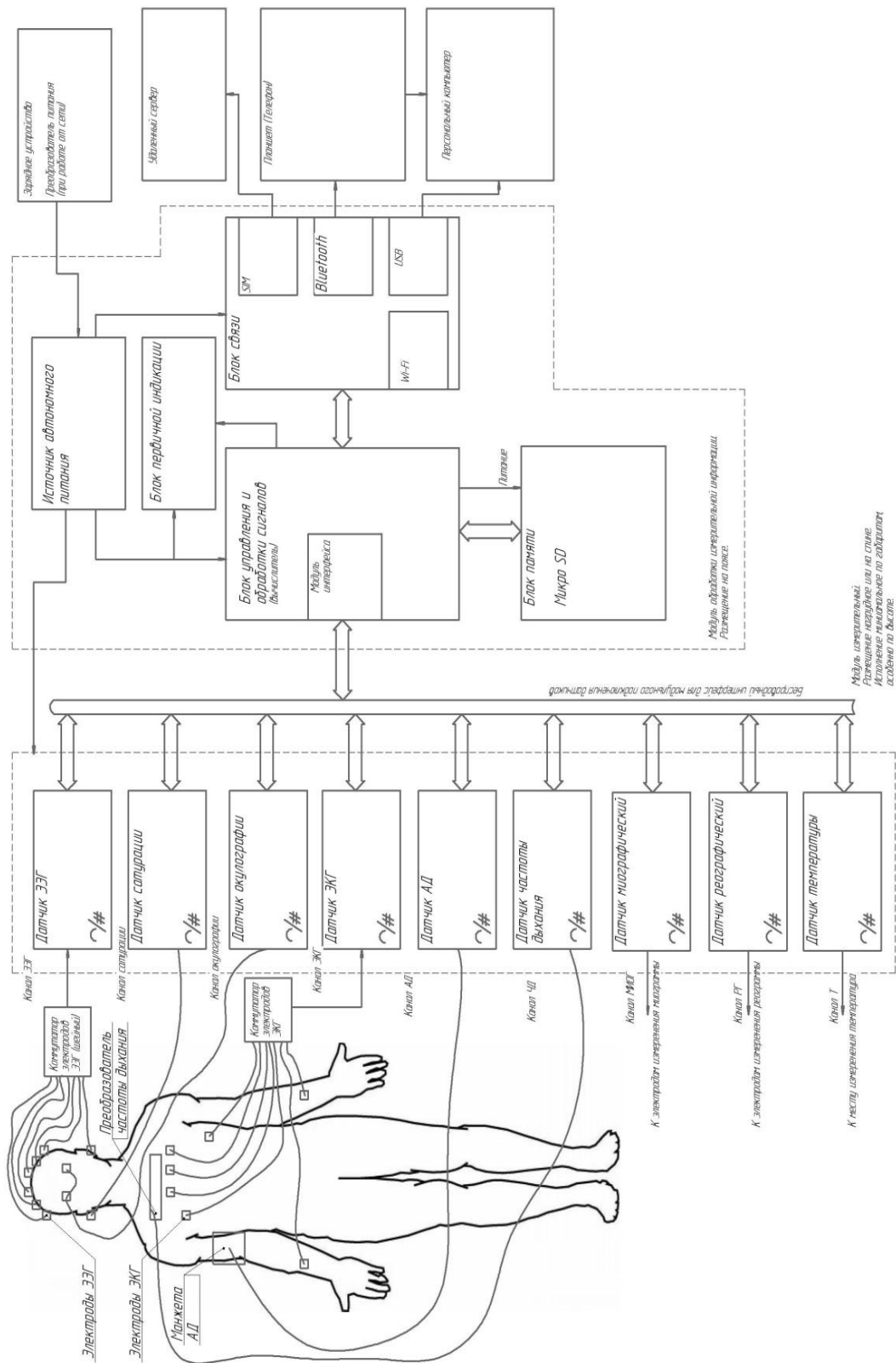


Рис. 1. Структурная схема программно-аппаратного комплекса

Fig. 1. Block diagram of the software and hardware complex

Интерфейс взаимодействия с удаленным сервером предназначен для оперативной передачи данных на сервер, осуществляющий углубленную обработку сигналов и данных результатов измерения (мониторинга) параметров, характеризующих основные функционально-диагностические показатели человека по средствам обработки больших данных. Программное обеспечение для

АПК предназначено для общего управления процессом измерения параметров, обмена данными между элементами и удаленным сервером, обработкой измерительной информации и документирования процесса мониторинга.

Рассмотрим подробнее реализацию нескольких каналов измерения функционально-диагностических показателей человека (рис. 2).

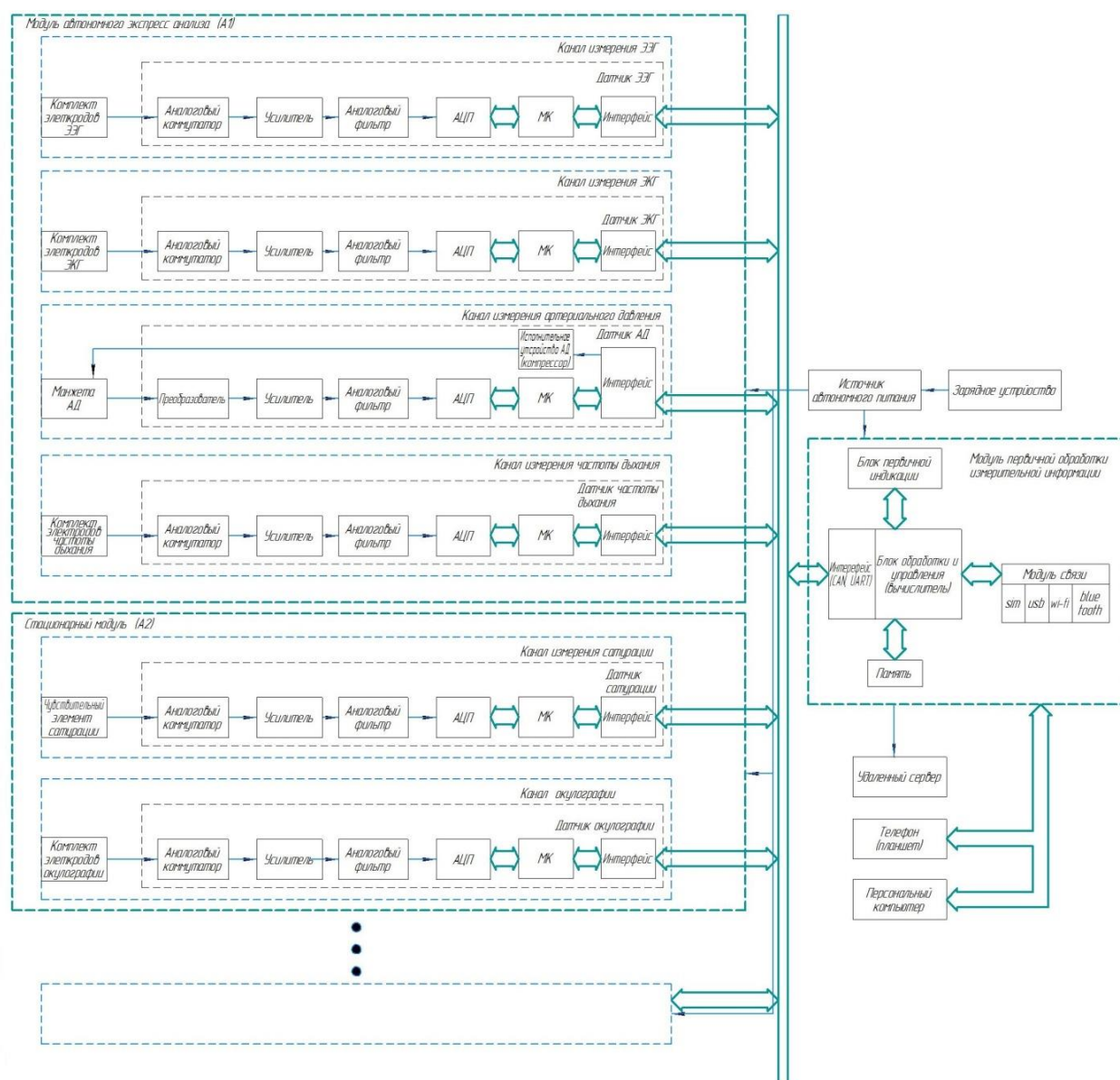


Рис. 2. Реализация каналов измерения показателей

Fig. 2. Implementation of channels for measuring parameters

Электрокардиография. ЭКГ формирует электрические сигналы, идентичные сократительной активности сердца [8]. Такие сигналы можно получить, прикрепив на конечности и грудную клетку человека от 3 до 12 электродов (отведений). С помощью ЭКГ можно определить частоту сердечных сокращений (уд./мин), и в зависимости от формы волн можно диагностировать сердечно-сосудистые заболевания и патологии. В сердечном цикле можно выделить 7 основных событий [9]. Первоначально происходит возбуждение синоатриального узла, возникает электрическая активность (сокращается предсердие), которая формирует Р-зубец, представляющий собой низкоамплитудную волну. Волна возбуждения сталкивается с задержкой в артриовентрикулярном узле, и формируется изоэлектрический PQ-сегмент. Стимулирующая волна быстро распространяется вверх, вызывая сокращение желудочков (деполяризация), который на кардиограмме можно увидеть в виде двух- или трехфазной волны QRS-комплекса. Мышечные клетки желудочков имеют большой потенциал действия [10]. Плато на таком сигнале формирует изоэлектрический ST-сегмент, который следует за QRS-комплексом. После чего происходит расслабление желудочков, обозначаемое на сигнале в виде Т-зубца. Наглядно типичный сигнал ЭКГ можно увидеть ниже (рис. 3). Видоизмененные сегменты и рубцы будут соответствовать отклонениям в сердечно-сосудистой системе или наличию патологий [11].



Рис. 3. Типичный сигнал ЭКГ

Fig. 3. Typical ECG signal

Получение сигнала ЭКГ производится по 12 каналам. Информация передается на аналоговый коммутатор, после чего сигнал усиливается и проводится аналоговая фильтрация. Полученный после фильтрации аналоговый сигнал попадает в АЦП, где преобразуется в цифровой сигнал, который можно хранить в электронном виде, обрабатывать с помощью микроконтроллеров, искусственного интеллекта и методов обработки больших данных.

Для избавления от высокочастотных и низкочастотных шумов и дребезга используется фильтр, параметры которого представлены ниже:

$$y(t) = y_l(t) + y_h(t), \quad (1)$$

где $y(t)$ – обработанный сигнал ЭКГ; $y_l(t)$ и $y_h(t)$ – сигналы низкочастотной и высокочастотной компонент соответственно.

$$\begin{aligned} y_l(t) &= x(t) * h_l(t), \\ y_h(t) &= x(t) * h(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где $x(t)$ – исходный сигнал ЭКГ; $h_l(t)$ – импульсная характеристика низкочастотного фильтра; $h(t)$ – импульсная характеристика высокочастотного сигнала; $*$ – операция свертки.

Имеется сигнал для обнаружения QRS-комплекса:

$$x'(t) = \frac{dx(t)}{dt}. \quad (3)$$

Полученная производная сигнала по среднему значению отфильтровывается по уровню чувствительности. После этого выполняется обнаружение время пиков по формуле

$$t = \frac{t}{x'(t)}. \quad (4)$$

Полученный после обработки сигнал можно классифицировать по состоянию сердечной активности.

Рассмотрим технические требования к каналу электрокардиограммы (табл. 1).

Таблица 1. Канал электрокардиограммы

Table 1. Electrocardiogram channel

Показатели	Значения
1. Количество отведений	От 3 до 12
2. Частота дискретизации ЭКГ (частота квантования), Гц	1000
3. Диапазон регистрируемых входных напряжений (динамический диапазон входного сигнала), мВ	От 0,03 до 300
4. Диапазон измеряемых напряжений, мВ	От 0,1 до 10
5. Диапазон частот полосы пропускания (диапазон частот, в котором неравномерность амплитудно-частотной характеристики канала ЭКГ не превышает 3 дБ), Гц	От 0,05 до 250
6. Входной импеданс, МОм, не менее	20
7. Относительная погрешность установки скорости развёртки (необходимо для получения точных показателей ЭКГ), %	10
8. Диапазон измерения частоты сердечных сокращений (ЧСС), уд./мин	От 15 до 300
9. Время непрерывных измерений, с	от 5 до 60

Также в процессе измерения ЭКГ параллельно можно измерять артериальное давление.

Электроэнцефалография. Актуальность исследования ЭЭГ обусловлена тем, что необходимо[4]:

- следить за динамикой действия лекарственных препаратов;
- оценить степень нарушения работы мозга;
- исследовать функциональное состояние мозга у людей;

– при повторных исследованиях ЭЭГ помогает оценить скорость и полноту исчезновения признаков нарушения работы мозга.

Для получения достоверных данных ЭЭГ необходимо понимать строение головного мозга. Головной мозг разделен продольной бороздой на два полушария. Важными для ЭЭГ являются части мозга: кора головного мозга, мозжечок, ствол мозга и таламус, поэтому для сравнительного анализа активности

различных частей головного мозга используется одновременная запись каналов ЭЭГ [12]. Рассмотрим систему наложения электродов ЭЭГ (рис. 4).

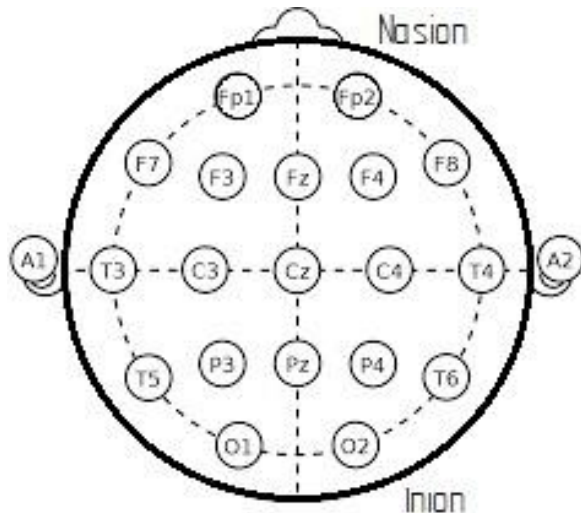


Рис. 4. Наложение электродов для ЭЭГ

Fig. 4. Application of electrodes for EEG

Сигнал ЭЭГ может быть получен несколькими способами: с использованием игольчатых электродов, носоглоточных электродов, интрацеребральных электродов и записи электрокортикограммы. Для точного результата ЭЭГ снимается при различных воздействиях на человека: состояние покоя, гипервентиляция, фото- и аудиостимуляция, сон. Процесс обработки сигнала с электрического канала подобен обработке ЭКГ. ЭЭГ-сигнал может быть использован для диагностики нервной системы, мониторинга фаз сна, диагностики эпилепсии и т. д. [13]

Рассмотрим технические требования к каналу электроэнцефалограммы (табл. 2).

Табл. 2. Канал электроэнцефалограммы

Table 2. Electroencephalogram channel

Показатели	Значения
1. Количество каналов ЭЭГ, шт.	От 4 до 8
2. Чувствительность, мкВ/мм	1; 2; 5; 7; 10; 20; 50; 70; 100; 200; 500; 1000
3. Диапазон измерения напряжения (от пика до пика), мкВ	от 5 до 12000
4. Частота среза фильтра верхних частот (ФВЧ), Гц	0,05; 0,5; 0,7; 1,5; 2; 5; 10
5. Частота среза фильтра нижних частот (ФНЧ), Гц	5; 10; 15; 35; 75; 100; 150; 200; 250; 500
6. Частота квантования ЭЭГ, Гц	100; 200; 500; 1000; 5000
7. Коэффициент подавления синфазной помехи, не менее, дБ	100
8. Подавление стационарной сетевой помехи сети отключаемым режекторным фильтром, дБ, не менее	40
9. Уровень внутренних шумов (от пика до пика), приведенных ко входу, мкВ, не более	2
10. Входной импеданс усилителей, МОм, не менее	400

Сатурация. Датчик сатурации используется для диагностики уровня кислорода в крови и частоты сердечных сокращений. Принцип работы данного устройства основан на фотоплетизмографии (ФПГ) и использовании двух различных световых волн. Данный датчик состоит из излучателя света – содержит два светодиода (LED), один из которых излучает красный свет (длина волны около 660 нм), а другой – инфракрасный (длина волны около 940 нм), и фотодетектора, который считывает количество света, проходящего через ткань.

Принцип работы датчика заключается в том, что он крепится на пальце, мочке уха или ином участке тела, где имеется доступ к капиллярам, и работает по принципу просвечивания или отражения. В зависимости от того, как

кислородосодержащий гемоглобин поглощает излучение, определяется уровень сатурации [14]. Сигнал от фотодетектора подвергается обработке в виде устранения фонового шума и артефактов, а также вычислению соотношения интенсивности света красного и инфракрасного, что определяет уровень кислорода в крови. На рисунке 5 представлена диаграмма сигнала, получаемого с прототипа датчика. На диаграмме просматриваются две временных области: с низким качеством сигнала (I) и с приемлемым качеством сигнала (II) [15]. Программное обеспечение должно выявлять временные участки, пригодные для анализа, и динамически формировать данные о сатурации и частоте пульсовых волн.

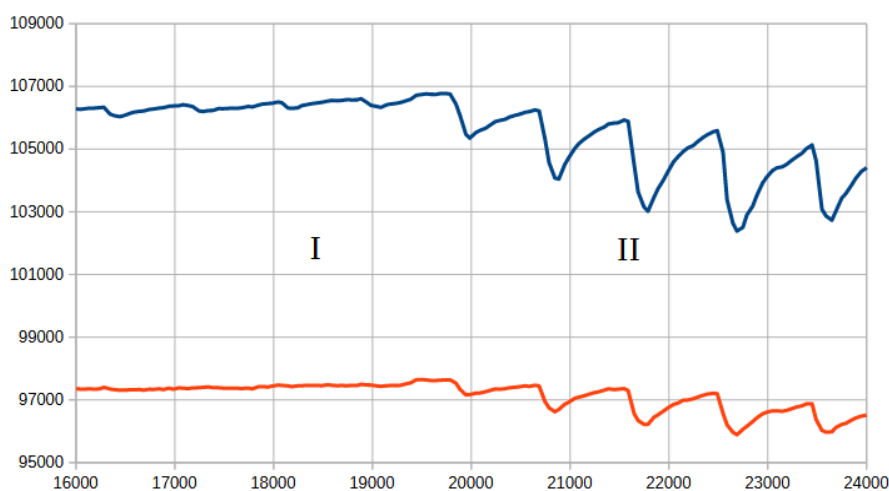


Рис. 5. Сигналы фотодетектора

Fig. 5. Photodetector signals

Окулография. Датчик окулографии позволяет получить информацию о движении человеческого глаза и его положении. Данный датчик активно

используется для диагностики различного рода заболеваний, а также для изучения реакции и поведения пациента в практических научных исследованиях.

Датчик позволяет учитывать угол поворота глаза, скорость движения и иные характеристики глаза. Реализация таких датчиков многообразна, однако самой распространенной считается электромиография глазных мышц.

Электроокулографический датчик подразумевает размещение электродов на коже вокруг глаза человека, которые позволяют регистрировать электрическую активность глазных мышц. Электроды в реализации метода могут быть поверхностными или инвазивными. Полученная с электродов информация анализируется специальными алгоритмами для понимания как функционирует глаз с последующим определением состояния нервной системы. Это позволяет обнаружить патологии, а также определить эффективность назначенного лечения.

Частота дыхания. Непрерывную дыхательную активность человека можно отследить с помощью датчика частоты дыхания. Такие датчики основываются на акселерометре, с помощью которого можно определить положение грудной клетки. Сигнал, полученный с датчика, проходит обработку и фильтрацию, после чего программно рассчитывается частота дыхания в минуту.

Электромиография. Датчик миографии измеряет электрическую активность мышц. Импульс, подаваемый от нервной системы, заставляет мышцы сокращаться, тем самым образуя разность потенциалов электрических сигналов в мышечных волокнах. Реализация датчика позволяет сделать неинвазивный

подход, т. е. крепление электродов к поверхности кожи. Полученные сигналы подвергаются обработке и анализу, программно можно вычислить: силу сокращения мышц, уровень расслабления и утомляемости человека, частоту и продолжительность мышечной активности. Результаты принято отображать графическим методом, что значительно упрощает медицинскому персоналу процесс анализа данных и принятия решения.

Реография. Датчик реографии позволяет неинвазивно измерять изменения в кровенаполнении тканей и органов. Данный метод позволяет оценить циркуляцию крови в организме с помощью исследования электрических свойств тканей человека. Активное применение реографические датчики нашли в кардиологии, неврологии и др. областях.

Температура тела. Датчик температуры состоит из полупроводниковых материалов, которые в зависимости от изменения температуры меняют свое напряжение. С помощью АЦП из напряжения формируется цифровой сигнал, который в дальнейшем отображается на дисплее АПК.

Программное обеспечение комплекса. При разработке программного обеспечения для АПК необходимо учитывать ряд требований, которые обеспечивают его функциональность, надежность и удобство его использования.

Функциональные требования:

– многопараметрический мониторинг: способность одновременно отслеживать несколько физиологических

параметров (например, сердечный ритм, артериальное давление, температура тела, уровень кислорода в крови и т. д.);

– сбор и хранение данных: эффективный сбор, обработка, хранение и архивирование данных о состоянии здоровья пользователя;

– обработка и анализ данных: наличие алгоритмов для анализа собранных данных, включая выявление отклонений от нормы и генерацию предупреждений;

– интерфейс пользователя (UI): удобный и интуитивно понятный интерфейс для отображения информации о состоянии пользователя, истории измерений и рекомендаций;

– настройки уведомлений: возможность настройки уведомлений о критических изменениях в состоянии пользователя как в виде визуальных, так и звуковых сигналов;

– кросс-платформенность: поддержка различных платформ (мобильные устройства, компьютеры) для доступа к информации.

Нефункциональные требования:

– производительность: возможность обработки и анализа данных в реальном времени без задержек;

– безопасность и конфиденциальность: защита данных пользователя, включающая шифрование передаваемой и хранимой информации, а также механизмы аутентификации доступа;

– надежность: высокая степень надежности и устойчивости к сбоям,

возможность восстановления системы после аварий;

– масштабируемость: возможность расширения функционала системы, добавления новых параметров мониторинга и интеграции с другими системами;

– совместимость: необходимость интеграции с различными сенсорными устройствами и медицинским оборудованием, а также совместимость с существующими медицинскими информационными системами.

Указанные требования необходимо учитывать на всех этапах разработки ПО. Соблюдение вышеперечисленных требований позволит реализовать надежное, безопасное и полезное устройство, которое позволит человеку не только контролировать свои показатели, но и дистанционно консультироваться с врачом, без посещения медицинских учреждений.

Комплексная оценка состояния здоровья человека

Для комплексной оценки состояния здоровья человека возможно применение интегрального критерия, учитывающего диагностируемые параметры. Структура и характеристика состояния и функциональных резервов организма [16]:

1. Здоров – уровень функциональных резервов высокий. Высокая работоспособность.

2. Практически здоров – высокий уровень функциональных резервов. Немного снижена работоспособность за счет психоэмоционального компонента.

3. Ослаблен – удовлетворительный уровень функциональных резервов и работоспособности. Ослабление регуляторных механизмов.

4. Преморбидное состояние – не удовлетворительный уровень функциональных резервов здоровья и работоспособности. Наличие ряда физиологических систем с низкими резервными возможностями.

5. Болен – низкий уровень резервов здоровья и работоспособности. Наличие функциональных отклонений являющихся причиной развития заболеваний.

6. Критическое состояние – крайне низкий (критический) уровень функциональных резервов и работоспособности.

В общем виде модель имеет вид:

$$a(x) = w_0 + w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_dx_d, \quad (5)$$

где w_0 – постоянный коэффициент; $w_1, w_2, \dots, w_d$ – весовые коэффициенты; $x_1, x_2, \dots, x_d$ – входные признаки.

На основе результатов измерения сигналов ЭКГ, ЭЭГ, реографии и др. модель выдает результат оценки общего состояния человека. Обработка осуществляется с помощью методов машинного обучения. Тип модели выбирается на основе анализа качества модели.

Основным критерием качества является точность – доля верных ответов (ассигасу), однако в медицинской области ситуация, когда у больного человека не было обнаружено заболевание, является недопустимой, необходимо использование дополнительных параметров, учитывающих два вида правильных ответов: True positive (TP), True negative (TN). Два вида ложных срабатываний: False positive (FP), false negative (FN).

Точность (precision) – можно ли доверять классификатору, когда он относит объект к положительному классу:

$$precision(a, X) = \frac{TP}{TP + FP}.$$

Полнота (recall) – доля выявленных положительных объектов:

$$recall(a, X) = \frac{TP}{TP + FN}.$$

Результаты и их обсуждение

С целью разработки многофункционального программно-аппаратного комплекса мониторинга функционального состояния организма человека выявлены значимые параметры и характеристики, поддающиеся неинвазивному инструментальному контролю. Определены требования к узлам комплекса, позволяющего оценивать функциональное состояние как с отвлечением, так и без отвлечения объекта контроля от профессиональной деятельности. Рассмотрим состав и характеристики каналов измерения (табл. 3).

Таблица 3. Состав и характеристики каналов измерения**Table 3.** Composition and characteristics of measurement channels

Канал	Информативность для оценки динамики состояния	Возможность использования без отвлечения объекта контроля от профессиональной деятельности
Электрокардиография	Высокая	Возможно с ограничениями
Электроэнцефалография	Высокая	Затруднено
Сатурация	Низкая	Возможно
Окулография	Средняя	Возможно с ограничениями
Частота дыхания	Низкая	Возможно
Электромиография	Средняя	Возможно с ограничениями
Реография	Средняя	Затруднено
Температура тела	Средняя	Возможно
Артериальное давление	Низкая	Возможно с ограничениями

Из таблицы 3 видно, что программно-аппаратный комплекс должен иметь модульную структуру и оперативно комплектоваться разными каналами в зависимости от сценариев использования. Таким образом, должен быть разработан единый интерфейс, позволяющий предавать и обрабатывать данные от различного количества каналов с отличающимися характеристиками.

Применение программ-аппаратного комплекса требует создания «облачных» систем хранения и обработки данных [17]. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку эффективных алгоритмов обработки исходной информации и формирования решений для поддержки медицинской диагностики [18]. При это особое внимание будет уделено вариабельности видов и объёмов первичных данных. Также будут разработаны технические решения,

позволяющие реализовать унифицированные программно-аппаратные интерфейсы, использующие широкую номенклатуру вычислительных средств (смартфоны, ноутбуки, планшеты и т. д.) [19; 20].

Выводы

Предлагаемый аппаратно-программный комплекс позволяет сделать значительный шаг вперед в сфере мониторинга физических параметров человека. Современные технологии позволяют без посещения врача провести комплексную оценку состояния организма, сравнить с показаниями, которые были ранее, проанализировать динамику, а также с помощью обработки данных и искусственного интеллекта помочь врачу в постановке диагноза и назначении лечения. Внедрение данного комплекса позволит сократить численность личных визитов пациентов к

медицинскому персоналу, что будет способствовать сокращению респираторных заболеваний и вирусных инфекций в период межсезонья [14]. Кроме

этого, человек получит возможность контролировать не только свое самочувствие, но и сможет самостоятельно найти причину недомогания.

Список литературы

1. Нгуен М. Т., Юлдашев З. М. Метод и аппаратно-программный комплекс для комплексной оценки физиологических резервов спортсмена во время тренировок // Биотехносфера. 2020. № 5 (65). С. 3–11.
2. Информационно-измерительная система для телемедицинского мониторинга состояния больного COVID-19 / В. А. Баранов, Е. А. Печерская, М. И. Сафронов, О. А. Тимохина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. Т. 1, № 35. С 85–92.
3. Глущенко В. А., Иркиенко Е. К. Сердечно-сосудистая заболеваемость – одна из важнейших проблем здравоохранения // Медицина и организация здравоохранения. 2019. № 1. С. 56–63.
4. Самородская И. В., Старинская М. А., Бойцов С. А. Динамика региональных показателей смертности от сердечно-сосудистых заболеваний и когнитивных нарушений в России 2019–2021 годах // Российский кардиологический журнал. 2023. № 28(4). С. 94–101. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2023-5256>
5. Цифровой электрокардиографический комплекс для риск-стратификации пароксизмов фибрилляции предсердий / А. В. Фролов, О. П. Мельникова, А. П. Воробьев, Т. Г. Вайханская // Современные технологии в медицине. 2024. Т. 16, № 3. С. 43–50. <https://doi.org/10.17691/stm2024.16.3.05>
6. Хайруллин А. А., Останина М. В., Погосян А. М. Возможности пульсоксиметрии в диагностике хронической артериальной недостаточности нижних конечностей // Смоленский медицинский альманах. 2015. № 1. С. 146–147.
7. Антонов А. А., Буров Н. Е. Системный аппаратный мониторинг (физиологические аспекты) // Вестник интенсивной терапии. 2010. № 3. С. 8–12.
8. Борисенко Т. Л., Снежицкий В. А. Клиническое значение нелинейных параметров вариабельности сердечного ритма у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями // Журнал Гродненского государственного медицинского университета. 2020. Т. 18, № 3. С. 223–229. <https://doi.org/10.25298/2221-8785-2020-18-3-223-229>
9. Успенский В. М. Информационная функция сердца. Теория и практика диагностики заболеваний внутренних органов методом информационного анализа электрокардиосигналов / под редакцией В. Б. Симоненко. М.: Центр ноосферного здоровья, 2023. 272 с.

10. Медико-биологическая теория и практика: монография / А. А. Хадарцев, В. М. Еськов, К. М. Козырев, С. Н. Гонтарев. Белгород: Белгородская областная типография, 2011. 231 с.

11. Yuldashev Z., Nemirko A., Manilo L., Mikhaylov E., Lebedev D., Anisimov A. Processing of Synchronous Recordings of Surface ECG and Intracardiac Potentials for Diagnostics of Dangerous Heart Rate Disturbances // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). Yekaterinburg, 25–26 April, 2019.

12. Амплитудно-частотное картирование для поддержки клинициста при визуальном анализе электроэнцефалограммы / Я. А. Фурман, В. В. Севастьянов, И. Д. Стулин, К. О. Иванов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2018. № 3 (39). С. 20–38. <https://doi.org/10.15350/2306-2819.2018.3.20>

13. Беляев О. В., Самыгин Д. В. Рекомендации экспертного совета по нейрофизиологии Российской Противозепилептической Лиги по проведению рутинной ЭЭГ // Эпилепсия и пароксизмальные состояния. 2016. Т. 8, № 4. С. 99–108.

14. Захаров С. М., Знайко Г. Г. Спектральный анализ электрокардиосигналов // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 3. С. 110–115.

15. Photoplethysmogram Analysis and Applications: An Integrative Review / J. Park, H. S. Seok, S.-S. Kim, H. Shin // Front. Physiol. 2022. N 12. P. 808451. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.808451>

16. Харланова К. С., Селихов А. В., Ревякина М. О. Канал оценки состояния сердечно-сосудистой системы человека на основе многопараметрического мониторинга сигналов с совместной обработкой сигналов // Наука молодых – будущее России: сборник научных статей IX Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых (12–13 декабря 2024 года): в 5 т. Курск: Университетская книга, 2024. Т. 3. С. 219–227.

17. Дембовский М. В., Писарева А. В. Разработка биотехнической системы магнитопплетизмографии для мониторинга частоты дыхания и частоты сердечных сокращений // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2020. Т. 19, № 4. С. 119–126.

18. Юрченко Н. Ю., Соседов А. И. Оценка перспектив развития мобильной медицины // Инновации и инвестиции. 2019. № 5. С. 298–304.

19. Живолупова Ю. А. Информационное и методическое обеспечение системы удаленного кардиореспираторного мониторинга для диагностики нарушений дыхания во сне // Биотехносфера. 2019. № 6 (64). С. 41–46.

20. Разработка экспертной системы для диагностики заболеваний легких на основе нейросетевого моделирования / Е. И. Новикова, Е. А. Андрианова, Е. Е. Удодова [и др.] // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2021. Т. 20, № 1. С. 155–159.

References

1. Nguyen M.T., Yuldashev Z.M. Method and hardware and software package for a comprehensive assessment of an athlete's physiological reserves during training. *Biotechnology = Biotekhnosfera*. 2020;(5):3–11. (In Russ.)

2. Baranov V.A., Pecherskaya E.A., Safronov M.I., Timokhina O.A. Information and measurement system for telemedicine monitoring of the patient's condition COVID-19. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2021;1(35):85–92. (In Russ.)

3. Glushchenko V.A., Irklienko E.K. Cardiovascular morbidity is one of the most important health problems. *Medsina i organizatsiya zdravookhraneniya = Medicine and Healthcare Organization*. 2019;(1):56–63. (In Russ.)

4. Samorodskaya I.V., Starinskaya M.A., Boytsov S.A. Dynamics of regional mortality rates from cardiovascular diseases and cognitive impairments in Russia 2019–2021. *Rossiiskii kardiologicheskii zhurnal = Russian Journal of Cardiology*. 2023;(28):94–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2023-5256>

5. Frolov A.V., Melnikova O.P., Vorobyov A.P., Vaikhanskaya T.G. Digital electrocardiographic complex for risk stratification of atrial fibrillation symptoms. *Sovremennye tekhnologii v meditsine = Modern Technologies in Medicine*. 2024;16(3):43–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.17691/stm2024.16.3.05>

6. Khairullin A.A., Ostanina M.V., Poghosyan A.M. Possibilities of pulse oximetry in the diagnosis of chronic arterial insufficiency of the lower extremities. *Smolenskii meditsinskii al'manakh = Smolenskiy Medical Almanac*. 2015;(1):146–147. (In Russ.)

7. Antonov A.A., Burov N.E. System hardware monitoring (physiological aspects). *Vestnik Intensivnoi terapii = Bulletin of Intensive Care*. 2010;(3):8–12. (In Russ.)

8. Borisenko T.L., Snezhitsky V.A. The clinical significance of nonlinear parameters of heart rate variability in patients with cardiovascular diseases. *Zhurnal Grodnenskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta = Journal of the Grodno State Medical University*. 2020;18(3):223–229. (In Russ.) <https://doi.org/10.25298/2221-8785-2020-18-3-223-229>

9. Uspensky V.M. Informational function of the heart. Theory and practice of diagnostics of diseases of internal organs by the method of information analysis of electrocardiosignals. Moscow: Tsentr noosfernogo zdorov'ya; 2023. 272 p. (In Russ.)

10. Khadartsev A.A., Eskov V.M., Kozyrev K.M., Gontarev S.N. Medical and biological theory and practice. Belgorod: Belgorodskaya oblastnaya tipografiya; 2011. 231 p. (In Russ.)
11. Yuldashev Z., Nemirko A., Manilo L., Mikhaylov E., Lebedev D., Anisimov A. Processing of Synchronous Recordings of Surface ECG and Intracardiac Potentials for Diagnostics of Dangerous Heart Rate Disturbances. *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). Yekaterinburg, 25–26 April 2019.*
12. Furman Ya.A., Sevastyanov V.V., Stulin I.D., Ivanov K.O. Amplitude-frequency mapping to support a clinician in the visual analysis of an electroencephalogram. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy = Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Radio Engineering and Infocommunication Systems.* 2018;(3):20–38. <https://doi.org/10.15350/2306-2819.2018.3.20>
13. Belyaev O.V., Samygin D.V. Recommendations of the Expert Council on Neurophysiology of the Russian Antiepileptic League for routine EEG. *Epilepsiya i paroksizmal'nye sostoyaniya = Epilepsy and Paroxysmal States.* 2016;8(4):99–108.
14. Zakharov S.M., Znayko G.G. Spectral analysis of electrocardiosignals. *Voprosy radioelektroniki = Radio Electronics Issues.* 2017;(3):110–115. (In Russ.)
15. Park J., Seok H.S., Kim S.-S., Shin H. Photoplethysmogram Analysis and Applications: An Integrative Review. *Front. Physiol = Front. Physiol.* 2022;(12):808451. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.808451>
16. Kharlanova K.S., Selikhov A.V., Revyakina M.O. A channel for assessing the state of the human cardiovascular system based on multiparametric signal monitoring with joint signal processing. In: *Nauka molodykh – budushchee Rossii: sbornik nauchnykh statei IX Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh (12–13 dekabrya 2024 goda) = Science of the young – the future of Russia: Collection of scientific articles of the IX International Scientific Conference of promising developments of Young Scientists, 12–13 December 2024.* Vol. 3. Kursk: Universitetskaya kniga; 2024. P. 219–227. (In Russ.)
17. Dembovsky M.V., Pisareva A.V. Development of a biotechnical magnetoplethysmography system for monitoring respiratory rate and heart rate. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems.* 2020;19(4):119–126.
18. Yurchenko H.Yu., Neighbors A.I. Assessment of prospects for the development of mobile medicine. *Innovatsii i investitsii = Innovations and Investments.* 2019;(5):298–304. (In Russ.)

19. Zhivolupova Yu.A. Information and methodological support for a remote cardiorespiratory monitoring system for the diagnosis of sleep-breathing disorders. *Biotekhnosfera = Biotechnosphere*. 2019;(6):41–46. (In Russ.)

20. Novikova E.I., Andrianova E.A., Udodova E.E., et al. Development of an expert system for the diagnosis of lung diseases based on neural network modeling. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2021;20(1):155–159. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Харланова Кристина Сергеевна, аспирант, научный сотрудник лаборатории молекулярной, трансляционной и цифровой кардиоиммунологии, Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, г. Орёл, Российская Федерация, e-mail: hks0312@mail.ru

Kristina S. Kharlanov, Post-Graduate Student, Research Fellow of the Laboratory of Molecular, Translational and Digital Cardioimmunology, Orel State University named after I.S. Turgenev, Oryol, Russian Federation, e-mail: hks0312@mail.ru

Ревякина Мария Олеговна, кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории молекулярной, трансляционной и цифровой кардиоиммунологии, Орловский государственный университет, имени И. С. Тургенева, г. Орёл, Российская Федерация, e-mail: moplotnikova@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1593-5290, Author ID: 676230

Maria O. Revyakina, Candidate of Sciences (Medical), Leading Researcher of the Laboratory of Molecular, Translational and Digital Cardioimmunology, Orel State University named after I.S. Turgenev, Oryol, Russian Federation, e-mail: moplotnikova@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1593-5290, Author ID: 676230

Селихов Алексей Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории молекулярной, трансляционной и цифровой кардиоиммунологии, Орловский государственный университет, имени И. С. Тургенева, г. Орёл, Российская Федерация, e-mail: selihov.ostu@yandex.ru, Author ID: 615912

Aleksey V. Selikhov, Candidate of Sciences (Engineering), Senior Researcher of the Laboratory of Molecular, Translational and Digital Cardioimmunology, Orel State University named after I.S. Turgenev, Oryol, Russian Federation, e-mail: selihov.ostu@yandex.ru, Author ID: 615912

Донцов Венедикт Михайлович, кандидат
технических наук, Орловский государственный
университет имени И. С. Тургенева,
г. Орёл, Российская Федерация
e-mail: dwm257@yandex.ru

Venedikt M. Dontsov, Candidate of Sciences
(Engineering), Orel State University named
after I.S. Turgenev,
Oryol, Russian Federation,
e-mail: dwm257@yandex.ru

Мишин Владислав Владимирович, кандидат
технических наук, доцент кафедры
электроники, радиотехники и систем связи,
Орловский государственный университет
имени И. С. Тургенева,
г. Орёл, Российская Федерация,и
e-mail: zam_fdo@mail.ru

Vladislav V. Mishin, Candidate of Sciences
(Engineering), Associate Professor
of the Department of Electronics, Radio
Engineering and Communication Systems,
Orel State University named after I.S. Turgenev,
Oryol, Russian Federation,
e-mail: zam_fdo@mail.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-190-203>

УДК 004.451

Модель и реализация комбинаторного разбора языков, заданных контекстно-свободными грамматиками

А. А. Чаплыгин¹ ✉

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

✉ e-mail: alex_chaplygin@mail.ru

Резюме

Цель исследования заключается в моделировании и реализации системы функций и комбинаторов для разбора языков, которые могут быть заданы с помощью контекстно-свободных грамматик, а также уменьшении исходного кода программы разбора.

Методы. С помощью денотационной семантики была построена формальная модель системы функций и комбинаторов для разбора, определен тип функции разбора, заданы базовые функции разбора: успешный разбор, неудачный разбор, разбор по предикату. На основе базовых функций задана функция разбора заданного символа. Приведена формальная модель комбинатора последовательности функций разбора, комбинатора параллельного (альтернативного) разбора, комбинатора применения функции к результатам разбора. Также с помощью денотационной семантики заданы комбинаторы повторения функции разбора.

Результаты. На основе полученных комбинаторов и функций разбора продемонстрирована реализация разбора языка *Common Lisp*. Сначала приводится грамматика языка в расширенной форме Бэкуса-Наура. Затем приводятся функции разбора при лексическом анализе: функции пустот, десятичных чисел, шестнадцатеричных чисел, идентификаторов, одиночных символов. Затем на основе предыдущих функций задаются функции разбора чисел, строк, атомов, списков, массивов, функциональных замыканий и самих s-выражений. Также приводится результирующая функция, объединяющая предыдущие функции. Полученная программа сравнивается по метрике LOC (число строк кода) с эталонной реализацией лексического и синтаксического анализатора, написанных на языке C.

Заключение. В результате работы была построена и реализована модель системы функций и комбинаторов для разбора языков, которые могут быть заданы контекстно-свободными грамматиками. Программа разбора, использующая данную систему, получается довольно компактной за счет того, что грамматики и семантические правила записываются декларативно практически в своем денотационном виде. Это позволяет в несколько раз сократить число строк кода по сравнению с нисходящей рекурсивной реализацией разбора.

Ключевые слова: разбор; комбинаторы; контекстно-свободные грамматики; денотационная семантика.

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

Для цитирования: Чаплыгин А. А. Модель и реализация комбинаторного разбора языков, заданных контекстно-свободными грамматиками // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 2. С. 190–203. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-190-203>

Поступила в редакцию 17.04.2025

Подписана в печать 14.05.2025

Опубликована 30.06.2025

Modeling and implementation of context free grammar combinatorial parser

Aleksandr A. Chaplygin¹ ✉

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

✉ e-mail: alex_chaplygin@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to model and implement a system of functions and combinators for parsing languages that can be defined using context-free grammars, as well as to reduce the source code of the parsing program.

Methods. Using denotational semantics, a formal model of a system of functions and combinators for parsing was constructed, the type of parsing function was determined, and basic parsing functions were defined: successful parsing, unsuccessful parsing, and predicate parsing. Based on the basic functions, a function for parsing a given character is defined. A formal model of a combinator of a sequence of parsing functions, a combinator of parallel (alternative) parsing, and a combinator of applying a function to the results of parsing is given. Denotational semantics is also used to define combinators for repeating the parsing function.

Results. Based on the obtained combinators and parsing functions, the implementation of Common Lisp parsing is demonstrated. First, the grammar of the language in the extended Backus-Naur form is given. Then the parsing functions for lexical analysis are given: functions of voids, decimal numbers, hexadecimal numbers, identifiers, and single characters. Then, based on the previous functions, functions for parsing numbers, strings, atoms, lists, arrays, functional closures, and the s-expressions themselves are set. The resulting function combining the previous functions is also provided. The resulting program is compared by the LOC metric (number of lines of code) with a reference implementation of a lexical and syntactic analyzer written in C.

Conclusion. As a result of the work, a model of a system of functions and combinators for parsing languages that can be specified by context-free grammars was built and implemented. The parsing program using this system is quite compact due to the fact that grammars and semantic rules are written declaratively in almost their denotational form. This allows you to reduce the number of lines of code several times compared to the top-down recursive implementation of parsing.

Keywords: parsing; combinators; context-free grammars; denotational semantics.

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

For citation: Chaplygin A.A. Modeling and implementation of context free grammar combinatorial parser. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2025;15(2):190–203. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-190-203>

Received 17.04.2025

Accepted 14.05.2025

Published 30.06.2025

Введение

Комбинаторные функции для разбора грамматик – это функции высших порядков, которые принимают в качестве аргументов другие функции разбора и возвращают новую функцию разбора грамматик. Функция разбора грамматики принимает на входе строку или список исходных объектов и возвращает структуру: обычно синтаксическое дерево разбора или данные, где разбор успешно завершился. С помощью комбинаторов происходит нисходящий рекурсивный разбор и возможно модульное построение элементов грамматики а также модульное тестирование [1].

Комбинаторный разбор [2] обширно используется при разработке компиляторов [3], обработчиков предметно-ориентированных языков [4] и интерфейсов обработки естественных языков [5].

Первый обработчик естественного языка [6] был продемонстрирован в работе [7]. Здесь комбинаторный разбор использовался для интерпретации английского языка. Комбинаторный разбор грамматики эквивалентен нисходящему рекурсивному разбору с полным возвратом [8].

Базовые функции разбора и базовые комбинаторы приведены в работе [9]. Они включают в себя функции успешного разбора, неудачного разбора, разбор по заданному предикату, откуда

следует функция разбора заданного одиночного символа или объекта. Базовые комбинаторы – это комбинатор альтернативы из двух возможных разборов, комбинатор последовательности двух разборов. Дополнительные комбинаторы – комбинатор повторения заданной функции разбора ноль или более раз и комбинатор повторения заданной функции разбора один или более раз. В результате выражения грамматики вместе с семантикой преобразования непосредственно моделируются с помощью функций и комбинаторов.

Разбор на основе монад был приведен в работе [10]. Использование последовательности действий в монаде упрощает обработку результата разбора, вложенных кортежей или списков, делает выражения разбора более компактными. Монада для разбора может быть выражена в модульном стиле как две более простые монады. Базовые комбинаторы для разбора не нужно задавать явно, они появляются в результате поднятия монады от базовой до конкретной монады с параметром.

Разбор при помощи комбинаторов не ограничивается контекстно-свободными грамматиками [11], также могут быть разобраны неоднозначные LL(k) грамматики¹. Неоднозначности не проявляются до момента разбора, в этом случае рекурсивный разбор может

¹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022610266 Российская Федерация. Генератор легковесных

LL(1) и LR(1) синтаксических анализаторов / А. В. Головешкин. № 2021681187; заявл. 20.12.22; опубл. 11.01.22.

выбрать один из неоднозначных путей и привести к неожиданному результату – семантическим коллизиям при использовании языка. Чтобы избежать подобных ошибок, необходимо устранить неоднозначности и использовать контекстно-свободные грамматики.

Наивная реализация комбинаторов как рекурсивный нисходящий разбор требует экспоненциальные расходы времени и памяти при разборе неоднозначных контекстно-свободных грамматик. Использование мемоизации [12] позволяет уменьшить сложность до полиномиальной [13].

Как и любой нисходящий рекурсивный разбор, комбинаторный разбор сталкивается с проблемой левой рекурсии, которая может быть решена изменением исходных продукций [14].

В этой работе была разработана и реализована модель комбинаторного разбора для языка Common Lisp [15]. Этот язык отличает простота синтаксических конструкций [16], что упрощает разбор.

Материалы и методы

Воспользуемся денотационной семантикой и лямбда-исчислением [17], чтобы построить модель функций и комбинаторов для разбора. Любая функция разбора P будет иметь следующий тип:

$$P : [\text{Char}] \rightarrow [(\text{Res}, [\text{Char}])] \quad (1)$$

где $[\text{Char}]$ – список разбираемых символов (объектов); Res – тип результатов разбора.

Таким образом, исходный список символов преобразуется в список пар,

где каждая пара состоит из результата разбора и остатка – списка неразобранных символов.

Список результатов выбран для того, чтобы была возможность получить несколько результатов (альтернативы в разборе). Неудачный разбор заканчивается пустым списком $[]$.

Простейший разбор – базовая функция, которая всегда возвращает успешный разбор с заданным значением:

$$\text{parse_suc} : \text{val} \rightarrow P$$

$$\text{parse_suc}(\text{val}) = \lambda l. [(\text{val}, l)] \quad (2)$$

В формуле (2) заданное значение сразу является результатом разбора, список не изменяется.

Базовая функция постоянного неудачного разбора возвращает пустой список:

$$\text{parse_fail} : P$$

$$\text{parse_fail}() = \lambda l. [] \quad (3)$$

Разбор по предикату заключается в том, что задается функция – предикат, которая определяет, будет ли разбор удачным:

$$\text{parse_pred} : (C \rightarrow \text{bool}) \rightarrow P$$

$$\text{parse_pred}(\text{pr}) =$$

$$= \lambda [c : l]. \text{if } \text{pr}(c) [(\text{pr}(c), l)] \text{ else } [] \quad (4)$$

В формуле (4) обозначение $[c : l]$ означает, что c – первый символ списка; l – список без первого элемента; if – функция для условия.

Используя разбор по предикату, можно легко выразить функцию разбора, которая требует определенный символ в списке:

$$\text{parse_elem} : C \rightarrow P$$

$$\text{parse_elem}(c) = \text{parse_pred}(\lambda(c').c \equiv c') \quad (5)$$

Комбинатор последовательности принимает список функций разбора, каждая из которых последовательно применяется, накапливая результат разбора:

$$\begin{aligned} \text{parse_and} : [P] &\rightarrow P \\ \text{parse_and}([p_1, p_2, \dots, p_n]) &= \\ = \lambda l. [(x_1, x_2, \dots, x_n) | &(x_1, l_1) \leftarrow p_1(l) \\ &(x_2, l_2) \leftarrow p_2(l_1) \\ &\dots \\ &(x_n, l_n) \leftarrow p_n(l_{n-1})] \end{aligned} \quad (6)$$

Выражение $[x | x \leftarrow p]$ в формуле (6) означает генерацию списка из элементов x , которые возвращает функция p . Если генераторов несколько, то все списки, полученные для каждого генератора, объединяются между собой. В данном комбинаторе каждая функция разбора из списка применяется к результату предыдущего разбора, полученные на каждом этапе результаты объединяются в кортеж $(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Комбинатор альтернативы объединяет результаты разбора для всех функций примененных к исходному списку:

$$\begin{aligned} \text{parse_or} : [P] &\rightarrow P \\ \text{parse_or}([p_1, p_2, \dots, p_n]) &= \\ = \lambda l. p_1(l) \cup p_2(l) \cup \dots \cup p_n(l) \end{aligned} \quad (7)$$

Для возможности задания семантических правил прямо в выражениях комбинаторов удобно ввести комбинатор применения функции ко всем результатам разбора:

$$\begin{aligned} \text{parse_app} : P &\rightarrow (R \rightarrow V) \rightarrow P \\ \text{parse_app}(p, f) &= \lambda l. [f(x) | x \leftarrow p(l)] \end{aligned} \quad (8)$$

Функция f из формулы (8) имеет тип $R \rightarrow V$, означающий, что результат разбора R отображается на множество семантических значений V .

Комбинатор повторения заданной функции разбора последовательно применяет функцию разбора 0 или более раз до тех пор, пока разбор будет успешным:

$$\begin{aligned} \text{parse_many} : P &\rightarrow P \\ \text{parse_many}(p) &= \lambda l. \text{fst}([[x : xs] | x \leftarrow p(l), \\ &xs \leftarrow \text{parse_many}(p)]) \end{aligned} \quad (9)$$

Функция fst возвращает первый элемент списка, который будет являться списком результатов рекурсивного применения parse_many [формула (9)].

Если необходимо одно или более повторений заданной функции разбора, то можно ввести комбинатор:

$$\begin{aligned} \text{parse_some} : P &\rightarrow P \\ \text{parse_some}(p) &= \\ = \text{parse_and}(p, \text{parse_many}(p)) \end{aligned} \quad (10)$$

Результаты и их обсуждение

На основе комбинаторов разбора можно выразить синтаксические и семантические правила преобразования исходного языка в любую структуру. Продемонстрируем это на примере языка Common Lisp. Использование комбинаторов объединяет и лексический и синтаксический анализ.

Исходный язык представляется следующей системой грамматик в расширенной форме Бэкуса-Наура (рис. 1).

```

s ::= <ws> <atom> | <list>
atom ::= <symbol> | <number> | <array> |
        <char> | <string> | <function>
list ::= <ws> (<s>* <ws>)
array ::= #<list>
ws ::= [ \n\r\t]*
number ::= <decimal> | <hex>
decimal ::= [0-9]+
hex ::= 0x[0-9a-fA-F]+
symbol ::= <start_sym> <sym>*
start_sym ::= <letter> | <symbol>
sym ::= <letter> | <digit> | <symbol>
letter ::= [a-zA-Z]
digit ::= [0-9]
symbol ::= [+.*/_=&|<>%]
char ::= #<ascii_sym>
function ::= #'<s>
string ::= "<str_sym>*"
str_sym ::= <ascii_sym> | \n

```

Рис. 1. Грамматика языка Common Lisp

Fig. 1. Common Lisp grammar

При лексическом анализе всегда лексемы разделяются пустотами (пробелами,

переводами строк). Зададим функцию пропуска этих разделителей (рис. 2).

```

(defun skip-spaces ()
  (parse-many (parse-or
    (parse-elem #\ )
    (parse-elem (code-char 0xa))
    (parse-elem (code-char 0xd))
    (parse-elem (code-char 9))))))

```

Рис. 2. Пропуск разделителей

Fig. 2. Skipping whitespace

Здесь `is_whitespace` – предикат проверки, что символ является разделителем.

При разборе десятичного числа необходимо получить само число, для

этого цифры соединяются в строку, и полученная строка преобразуется в число по основанию 10 (рис. 3).

```

(defun parse-decimal ()
  (parse-app
    (parse-some (parse-pred #'is-digit)))
    #'(lambda (l) (strtoint (implode l) 10)))

```

Рис. 3. Разбор десятичного числа

Fig. 3. Decimal number parsing

Предикат `is-digit` проверяет символ на цифру.

Разбор шестнадцатеричного числа аналогичен, за исключением игнориро-

вания первых символов и основания системы счисления (рис. 4).

```
(defun parse-hex ()
  (parse-app
    (parse-and
      (parse-char #\0)
      (parse-char #\x)
      (parse-some (parse-pred #'is-hex-sym)))
    #'(lambda (l) (strtoint (implode (third l)) 16))))
```

Рис. 4. Разбор шестнадцатеричного числа

Fig. 4. Hexadecimal number parsing

Здесь используется предикат проверки на корректную цифру `is-hex-sym`.

Теперь функция разбора числа становится тривиальной (рис. 5).

```
(defun parse-tnumber ()
  (parse-or (parse-hex) (parse-decimal)))
```

Рис. 5. Разбор числа

Fig. 5. Number parsing

При разборе символа требуется преобразование символов в верхний регистр (рис. 6).

```
(defun parse-tsymbol ()
  (parse-app
    (parse-and
      (parse-or (parse-pred #'is-alpha)
        (parse-pred #'is-lisp-symbol))
      (parse-many (parse-or (parse-pred #'is-alpha)
        (parse-pred #'is-digit)
        (parse-pred #'is-lisp-symbol))))
    #'(lambda (l) (intern (implode
      (map #'(lambda (char) (toupper char))
        (cons (car l) (second l))))))))
```

Рис. 6. Разбор символа

Fig. 6. Symbol parsing

Здесь символ может начинаться с буквы (предикат `is-alpha`) или разрешенного символа (предикат `is-lisp-symbol`), а

дальше могут быть буквы, цифры или символы.

Разбор одиночного константного символа тривиален (рис. 7).

```
(defun parse-tchar ()
  (parse-app
    (parse-and
      (parse-char #\#)
      (parse-char #\\)
      (parse-pred #'(lambda (sym) t))) #'third))
```

Рис. 7. Разбор одиночного символа

Fig. 7. Character parsing

При разборе строки нужно учитывать, что внутренний символ не может быть кавычкой, но может содержать есc-последовательность (экранирование), которая должна быть заменена на

соответствующее значение. Для этого вводится дополнительная функция разбора есc-последовательности, для которой задаются эти параметры (рис. 8).

```
(defun parse-escape (char value)
  "Разбор экранирования"
  (parse-app
    (parse-and
      (parse-char #\\)
      (parse-char char))
    #'(lambda (l) (list value))))
```

```
(defun parse-tstring ()
  "Разбор строки"
  (parse-app
    (parse-and
      (parse-char #")
      (parse-many (parse-or (parse-escape #\n (code-char 0xa))
        (parse-pred #'(lambda (sym)
          (!= sym #\"))))))
      (parse-char #\"))
    #'(lambda (l) (implode (second l))))
```

Рис. 8. Разбор строки

Fig. 8. String parsing

Комбинатор `parse-many` возвращает список символов, который необходимо соединить в строку, никаких других дополнительных преобразований не нужно.

```
(defun parse-atom ()
  (parse-or (parse-tnumber)
            (parse-tsymbol)
            (parse-tarray)
            (parse-tchar)
            (parse-tfunction)
            (parse-tstring)))
```

Рис. 9. Разбор атома

Fig. 9. Atom parsing

Остальные функции разбора взаимно рекурсивные. Разбор атома (элемента списка) происходит в точности как в грамматике (рис. 9).

Список представляет собой множество *s*-выражений в скобках (рис. 10).

```
(defun parse-list ()
  (parse-app (parse-and
              (parse-char #\)
              (parse-many (parse-s))
              (parse-char #\))) #'second))
```

Рис. 10. Разбор списка

Fig. 10. List parsing

Здесь комбинатор `parse-many` возвращает готовый список, никаких других преобразований не требуется.

Массив напоминает список (удобно воспользоваться уже готовой функцией разбора), только требуется преобразование списка в массив (рис. 11).

```
(defun parse-tarray ()
  (parse-app
   (parse-and
    (parse-char #\)
    (parse-list))
   #'(lambda (l) (list-to-array (second l)))))
```

Рис. 11. Разбор массива

Fig. 11. Array parsing

Функциональное замыкание – это s-выражение, начинающееся со специальных символов (рис. 12).

Само s-выражение – это или атом, начинающийся с разделителя, или список (рис. 13).

```
(defun parse-tfunction ()
  (parse-app
   (parse-and
    (parse-char ##)
    (parse-char #' )
    (parse-s))
   #'(lambda (l) (list 'FUNCTION (third l)))))
```

Рис. 12. Разбор функционального замыкания

Fig. 12. Closure parsing

```
(defun parse-s ()
  (parse-or (parse-and (skip-space) (parse-atom)) (parse-list)))
```

Рис. 13. Разбор s-выражения

Fig. 13. S-expression parsing

Для вызова разбора удобно сделать отдельную функцию, которая принимает

строку символов, преобразует ее в список и выполняет разбор (рис. 14).

```
(defun parse-lisp (str)
  (caar (funcall (parse-s) (explode str))))
```

Рис. 14. Функция разбора

Fig. 14. Parse function

Таким образом, с помощью функций и комбинаторов были созданы лексический и синтаксический анализаторы для разбора функционального языка Common Lisp. В таблице 1 представлены метрики LOC (число строк) программ эталонного лексического и синтаксического анализаторов для интерпретатора

Common Lisp с поддержкой метапрограммирования [18], написанных на языке C, и программы разбора Common Lisp, написанной с помощью системы комбинаторов. Для второй программы нет необходимости в разделении на лексический и синтаксический анализ.

Таблица 1. Сравнение реализаций разбора языка Common Lisp**Table 1.** Common Lisp parsing variants comparation

Показатель	Лексический анализатор	Синтаксический анализатор	Всего	Отношение
Язык С	543	202	745	7,16 (4,4)
Система комбинаторов		104	104	1,0
Система комбинаторов вместе с библиотекой		169	169	1,0

Реализация разбора языка Common Lisp с помощью системы комбинаторов в 7 раз меньше по сравнению с реализацией на языке С. Если учитывать размер кода самой библиотеки, то код получается в 4,4 раза меньше по сравнению с эталонной реализацией.

Выводы

В результате работы была построена и реализована модель системы функций и комбинаторов для разбора языков, которые могут быть заданы контекстно-

свободными грамматиками. Программа разбора, использующая данную систему, получается довольно компактной за счет того, что грамматики и семантические правила записываются декларативно практически в своем денотационном виде. Это позволяет не только сократить код по сравнению с нисходящей рекурсивной реализацией разбора, но и избежать ошибок реализации, а также можно сосредоточиться на самих грамматических и семантических правилах.

Список литературы

1. Компиляторы: принципы, технологии и инструментарий / Альфред В. Ахо, Моника С. Лам, Рави Сети Джеффри. 2-е изд. М.: Вильямс, 2020. 1184 с.
2. Эванс Э. Предметно-ориентированное проектирование (DDD): структуризация сложных программных систем. М.: Вильямс, 2020. 448 с.
3. Душкин Р. В. Функциональное программирование на языке Haskell. М.: ДМК Пресс, 2016. 608 с.
4. Абельсон Х., Сассман Д. Структура и интерпретация компьютерных программ. М.: КДУ, 2022. 608 с.
5. Чаплыгин А. А. Использование метапрограммных средств языка Common Lisp для разработки систем эмуляторов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. № 3. С. 135–145.

6. Халилов Э. Р. разработка интерпретатора для языка программирования видео-игр // Информационно-компьютерные технологии в экономике, образовании и социальной сфере. 2020. № 1(27). С. 79–89. EDN KNIRUT
7. Frost R., Launchbury J. Constructing natural language interpreters in a lazy functional language // The Computer Journal. 1989. N 32(2). P. 108–121. <https://doi.org/10.1093/comjnl/32.2.108>
8. Соломатин Д. И. Экспериментальное исследование и оптимизация алгоритма нисходящего разбора с ограниченными возвратами для PEG-грамматик // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2013. № 2. С. 144–152. EDN RLTA BV
9. Hutton G. Higher-order functions for parsing // Journal of Functional Programming. 1992. N 2(3). P. 323–343. <https://doi.org/10.1017/s0956796800000411>
10. Hutton G., Meijer E. Monadic Parser Combinators. URL: <https://people.cs.nott.ac.uk/pszgmh/monparsing.pdf> (дата обращения: 22.03.2025).
11. Егинов Д. И., Лебедев А. А., Дорофеева О. С. Методы синтаксического разбора контекстно-свободных грамматик // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы: сборник научных статей VI Всероссийской межвузовской научно-практической конференции, г. Пенза, 13 марта 2019 года / под ред. Л. Р. Фионовой. Пенза: Пензенский государственный университет, 2019. С. 15–17. EDN EJCXLL
12. Frost R. A., Szydlowski B. Memoizing Purely Functional Top-Down Backtracking Language Processors // Science. Computer. Programming. 1996. N 27(3). P. 263–288. [https://doi.org/10.1016/0167-6423\(96\)00014-7](https://doi.org/10.1016/0167-6423(96)00014-7)
13. Frost R. A. Monadic Memoization towards Correctness-Preserving Reduction of Search // Proceedings of the 16th Canadian Society for Computational Studies of Intelligence Conference on Advances in Artificial Intelligence (AI'03). Berlin: Springer, 2003. P. 66–80.
14. Frost R. A., Hafiz R. A New Top-Down Parsing Algorithm to Accommodate Ambiguity and Left Recursion in Polynomial Time // ACM SIGPLAN Notices. 2006. N 41(5). P. 46–54. <https://doi.org/10.1145/1149982.1149988>. S2CID 8006549
15. Сайбель П. Практическое использование Common Lisp. М.: ДМК Пресс, 2017. 488 с.
16. Грэм Пол. ANSI Common LISP. СПб.: Символ-Плюс, 2020. 448 с.
17. Krishnamurthi S. Programming Languages: Application and Interpretation. Providence: Brown University, 2003. 376 p.
18. Чаплыгин А. А. Моделирование интерпретатора функционального языка программирования с возможностями метапрограммирования // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника,

References

1. Alfred V. Aho, Monica S. Lam, Ravi Sethi Jeffrey. Compilers: principles, technologies and tools. 2nd ed. Moscow: Williams; 2020. 1184 p. (In Russ.)
2. Evans E. Domain-oriented design (DDD): structuring complex software systems. Moscow: Williams; 2020. 448 p. (In Russ.)
3. Dushkin R. V. Functional programming in the Haskell language. Moscow: DMK Press; 2016. 608 p. (In Russ.)
4. Abelson H., Sussman D. Structure and interpretation of computer programs. Moscow: KDU; 2022. 608 p. (In Russ.)
5. Chaplygin A.A. The use of metaprogramming tools of the Common Lisp language for the development of emulator 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*. 2023;(3):135–145. (In Russ.)
6. Khalilov E.R. Development of an interpreter for the video game programming language. *Informatsionno-komp'yuternye tekhnologii v ekonomike, obrazovanii i sotsial'noi sfere = Information and computer technologies in economics, education and the social sphere*. 2020;(1):79–89. (In Russ.) EDN KNIRUT
7. Frost R., Launchbury J. Constructing natural language interpreters in a lazy functional language. *The Computer Journal*. 1989;(32):108–121. <https://doi.org/10.1093/comjnl/32.2.108>
8. Solomatin D.I. Experimental investigation and optimization of the algorithm of descending parsing with limited returns for PEG grammars. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii = Bulletin of Voronezh State University. Series: System Analysis and Information Technologies*. 2013;(2):144–152. (In Russ.) EDN RLTAHV
9. Hutton G. Higher-order functions for parsing. *Journal of Functional Programming*. 1992;(2):323–343. <https://doi.org/10.1017/s0956796800000411>
10. Hutton G., Meijer E. Monadic Parser Combinators. Available at: <https://people.cs.nott.ac.uk/pszgmh/monparsing.pdf> (accessed 22.03.2025).
11. Eginov D.I., Lebedev A.A., Dorofeeva O.S. Methods of syntactic analysis of context-free grammars. In: Fionovoi L.R. (ed.) *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy: sbornik nauchnykh statei VI Vserossiiskoi mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, g. Penza, 13 marta 2019 goda = Information technologies in science and education. Problems and prospects: Collection of scientific articles of the VI All-*

Russian Interuniversity Scientific and Practical Conference, 13 March 2019, Penza. Penza: Penza State University; 2019. P. 15–17. (In Russ.) EDN EJCXLL

12. Frost R.A., Szydlowski B. Memoizing Purely Functional Top-Down Backtracking Language Processors. *Science. Computer. Programming.* 1996;(27):263–288. [https://doi.org/10.1016/0167-6423\(96\)00014-7](https://doi.org/10.1016/0167-6423(96)00014-7)

13. Frost R.A. Monadic Memoization towards Correctness-Preserving Reduction of Search. In: *Proceedings of the 16th Canadian Society for Computational Studies of Intelligence Conference on Advances in Artificial Intelligence (AI'03)*. Berlin: Springer; 2003. P. 66–80.

14. Frost R.A., Hafiz R.A New Top-Down Parsing Algorithm to Accommodate Ambiguity and Left Recursion in Polynomial Time. *ACM SIGPLAN Notices.* 2006;(41):46–54. <https://doi.org/10.1145/1149982.1149988>. S2CID 8006549

15. Saibel P. Practical use of Common Lisp. Moscow: DMK Press; 2017. 488 p. (In Russ.)

16. Graham Paul. ANSI Common LISP. Saint Petersburg: Symbol-Plus; 2020. 448 p. (In Russ.)

17. Krishnamurthi S. Programming Languages: Application and Interpretation. Providence: Brown University; 2003. 376 p.

18. Chaplygin A.A. Modeling of a functional programming language interpreter with metaprogramming capabilities. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2024;(14):181–193. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-181-193>

Информация об авторе / Information about the Author

Чаплыгин Александр Александрович,
кандидат технических наук, доцент кафедры
программной инженерии, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: alex_chaplygin@mail.ru,
ORCID: 0009-0009-8739-2695

Aleksandr A. Chaplygin, Candidate of Sciences
(Engineering), Associate Professor
of the Department of Software Engineering,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: alex_chaplygin@mail.ru,
ORCID: 0009-0009-8739-2695

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-204-220>

УДК 617.58

Математическое моделирование взаимодействия элементов электромеханической многозвенной системы на примере реабилитационного экзоскелета нижних конечностей

С. Ф. Яцун¹ ✉, А. С. Печурин¹, Е. В. Савельева¹

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Цель исследования – разработка математической модели, анализ взаимодействия элементов трехзвенной электромеханической системы реабилитационного экзоскелета нижних конечностей и прогнозирование задающих воздействий.

Методы. В представленной статье рассматривается электромеханическая многозвенная система реабилитационного экзоскелета нижних конечностей. Анализ выполнен с использованием метода декомпозиции – расчленения системы на составляющие ее части и изучения функционирования каждой из частей в отдельности. На основе разработанной математической модели многозвенной системы проведен вычислительный эксперимент. Использован метод анимации, который создаёт виртуальную траекторию движения голеностопного шарнира человеко-машинной системы. Предложенный подход позволяет прогнозировать поведение системы, определять ее конфигурацию и, что важно, проводить оценку значений управляющих воздействий в виде крутящего момента электроприводов, обеспечивающих функционирование системы в рамках реабилитационных мероприятий.

Результаты. Получена математическая модель функционирования системы реабилитационного экзоскелета нижних конечностей, позволяющая прогнозировать взаимодействие элементов электромеханической многозвенной системы. На основании данных вычислительного эксперимента установлено, что управление гибридным приводом оказывает влияние на функционирование звеньев рассматриваемой системы. Разработан метод анимации, который создаёт виртуальную траекторию движения голеностопного шарнира, основанный на видеозахвате движения и антропоморфных параметрах. Результаты моделирования демонстрируют, что гравитационный компенсатор гибридного привода создаёт вспомогательный крутящий момент, компенсирующий часть гравитационных сил от элементов электромеханической системы. Показано влияние применения гибридного привода в бедренном шарнире на функционирование остальных звеньев электромеханической системы, проявляющееся в исключении высокочастотных колебаний коленного и голеностопного звеньев.

Заключение. Результаты математического моделирования позволяют прогнозировать взаимодействие элементов электромеханической системы и осуществлять эффективное управление приводной системой робота во времени. Обнаруженное влияние применения гибридного привода в бедренном шарнире на функционирование остальных звеньев электромеханической системы позволит создать устройство, способное выполнять свои функции в различных условиях эксплуатации и обеспечить параметры движения, близкие к антропоморфным.

Ключевые слова: электромеханическая многосвязная система; декомпозиция; реабилитация; видеозахват траектории; задающие воздействия; линейный гравитационный компенсатор; система экзоскелета нижних конечностей.

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

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

Для цитирования: Яцун С. Ф., Печурин А. С., Савельева Е. В. Математическое моделирование взаимодействия элементов электромеханической многосвязной системы на примере реабилитационного экзоскелета нижних конечностей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 2. С. 204–220. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-204-220>

Поступила в редакцию 12.04.2025

Подписана в печать 10.05.2025

Опубликована 30.06.2025

Mathematical modeling of the interaction of elements of an electromechanical multilink system using the example of a rehabilitation exoskeleton of the lower extremities

Sergey F. Yatsun¹ ✉, Alexander S. Pechurin, Ekaterina V. Saveleva

¹ Southwest State University

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop a mathematical model, analyze the interaction of the elements of a three-link electromechanical system of a rehabilitation exoskeleton of the lower extremities and predict the driving forces.

Methods. The presented article discusses an electromechanical multi-link system of a rehabilitation exoskeleton of the lower extremities. The analysis was performed using the decomposition method, which is the dismemberment of the system into its component parts and the study of the functioning of each part separately. Based on the developed mathematical model of a multi-link system, a computational experiment was conducted. The animation method is used, which creates a virtual trajectory of the ankle joint movement of a human-machine system. The proposed approach makes it possible to predict the behavior of the system, determine its configuration and, importantly, evaluate the values of control actions in the form of torque of electric drives that ensure the functioning of the system as part of rehabilitation measures.

Results. A mathematical model of the functioning of the rehabilitation skeleton system of the lower extremities has been obtained, which makes it possible to predict the interaction of elements of an electromechanical multilink system. Based on the data from the computational experiment, it was found that the control of the hybrid drive affects the functioning of the links of the system under consideration. An animation method has been developed that creates a virtual trajectory of the ankle joint based on video motion capture and anthropomorphic parameters. The simulation results demonstrate that the gravity compensator of the hybrid drive creates an auxiliary torque that compensates for part of the gravitational forces from the elements of the electromechanical system. The effect of using a hybrid drive in

the femoral joint on the functioning of the remaining links of the electromechanical system is shown, manifested in the exclusion of high-frequency vibrations of the knee and ankle links.

Conclusion. The results of mathematical modeling make it possible to predict the interaction of the elements of the electromechanical system and to effectively control the robot's drive system over time. The discovered effect of the use of a hybrid drive in the femoral sphere on the functioning of the remaining links of the electromechanical system will make it possible to create a device capable of performing its functions in various operating conditions and providing motion parameters close to anthropomorphic.

Keywords: electromechanical multi-link system; decomposition; rehabilitation; video trajectory capture; control actions; linear gravity compensator; exoskeleton system of the lower extremities.

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

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

For citation: Yatsun S.F., Pechurin A.S., Saveleva E.V. Mathematical modeling of the interaction of elements of an electromechanical multilink system using the example of a rehabilitation exoskeleton of the lower extremities. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2025;15(2):204–220. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-204-220>

Received 12.04.2025

Accepted 10.05.2025

Published 30.06.2025

Введение

В последние годы экзоскелеты стали важным инструментом в реабилитации пациентов с повреждениями опорно-двигательного аппарата [1], помогая им восстанавливать утраченные функции и возвращаться к активной жизни. Экзоскелетные системы обеспечивают интенсивную и целенаправленную тренировку, что ускоряет восстановление [2]. Они могут быть настроены для выполнения различных движений [3], адаптируя реабилитационные программы под индивидуальные потребности каждого пациента [4]. Это особенно важно для тех, кто не может самостоятельно выполнять необходимые упражнения [5] из-за слабости [6] или ограниченной подвижности [7].

Изучение особенностей совместного взаимодействия человека и экзоскелета породило термин «человеко-машинная система» (ЧМС) [6; 7]. Эффективность работы системы в целом может быть оценена с использованием метода декомпозиции [8] – разделения системы на составные элементы – подсистемы [9] и определения параметров эффективного функционирования каждой подсистемы [10]. Объектом исследования в данной работе выбрана электромеханическая многозвенная система экзоскелета нижних конечностей [11]. Экзоскелет нижних конечностей как подсистема человеко-машинной системы рассматривается в условиях данной работы без учета влияния человека [4].

Существуют технические проблемы, ограничивающие широкое применение и сдерживающие развитие экзоскелетных систем [12]. Одной из таких проблем является обеспечение эффективной работы электроприводов [13]. Современные экзоскелетные реабилитационные системы требуют установки мощных и в то же время компактных приводов [6], однако на управлении такими устройствами сказывается множество факторов, что затрудняет прогнозирование поведения системы в целом [14].

Для решения этой проблемы разрабатываются гибридные приводы [15], сочетающие преимущества электрических, пневматических и гидравлических систем. Такие устройства позволяют достичь оптимального баланса между мощностью, компактностью и эффективностью, повышая общую эффективность функционирования реабилитационных экзоскелетных систем [16].

Разработка и анализ математической модели трехзвенной электромеханической системы реабилитационного экзоскелета нижних конечностей с гибридным приводом позволит прогнозировать поведение системы и, что важно, проводить оценку значений управляющих воздействий в виде крутящего момента электроприводов, обеспечивающих функционирование системы в рамках реабилитационных мероприятий (рис. 1).

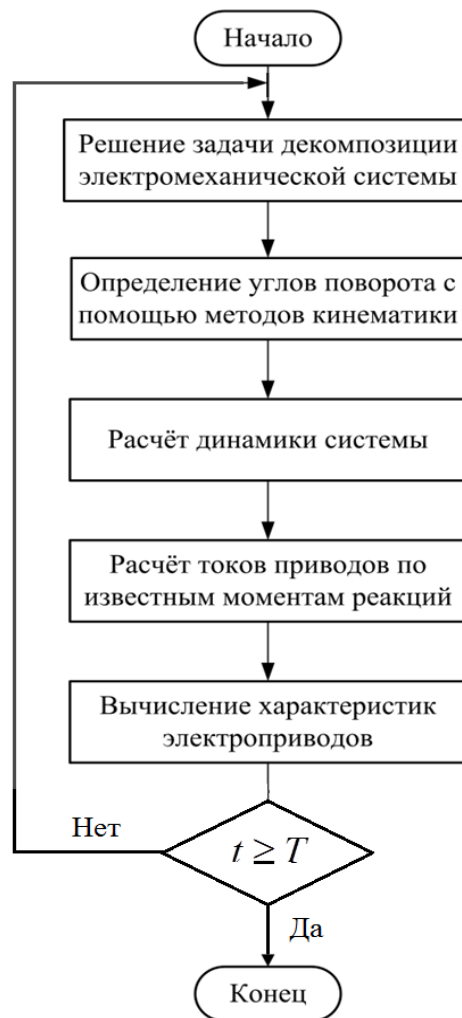


Рис. 1. Алгоритм вычисления параметров электроприводов с использованием метода декомпозиции

Fig. 1. Algorithm for calculating the parameters of electric drives using the decomposition method

На рисунке 1 представлен алгоритм определения управляющих воздействий электроприводов во времени. Процесс представляет собой рекурсивную схему, где T – полное время операции, которое может быть представлено в виде $T = t_0 + k\Delta t$ (t_0 – время начала операции, Δt – шаг по времени, k – количество временных интервалов). Представленная блок-схема дает возможность определять такие характеристики привода, как

напряжение, влияющее непосредственно на необходимый в заданное время крутящий момент бедренного, коленного и голеностопного шарниров.

Анализируемые временные промежутки могут быть сняты с графика желаемой траектории движения голеностопного шарнира по времени (рис. 2).

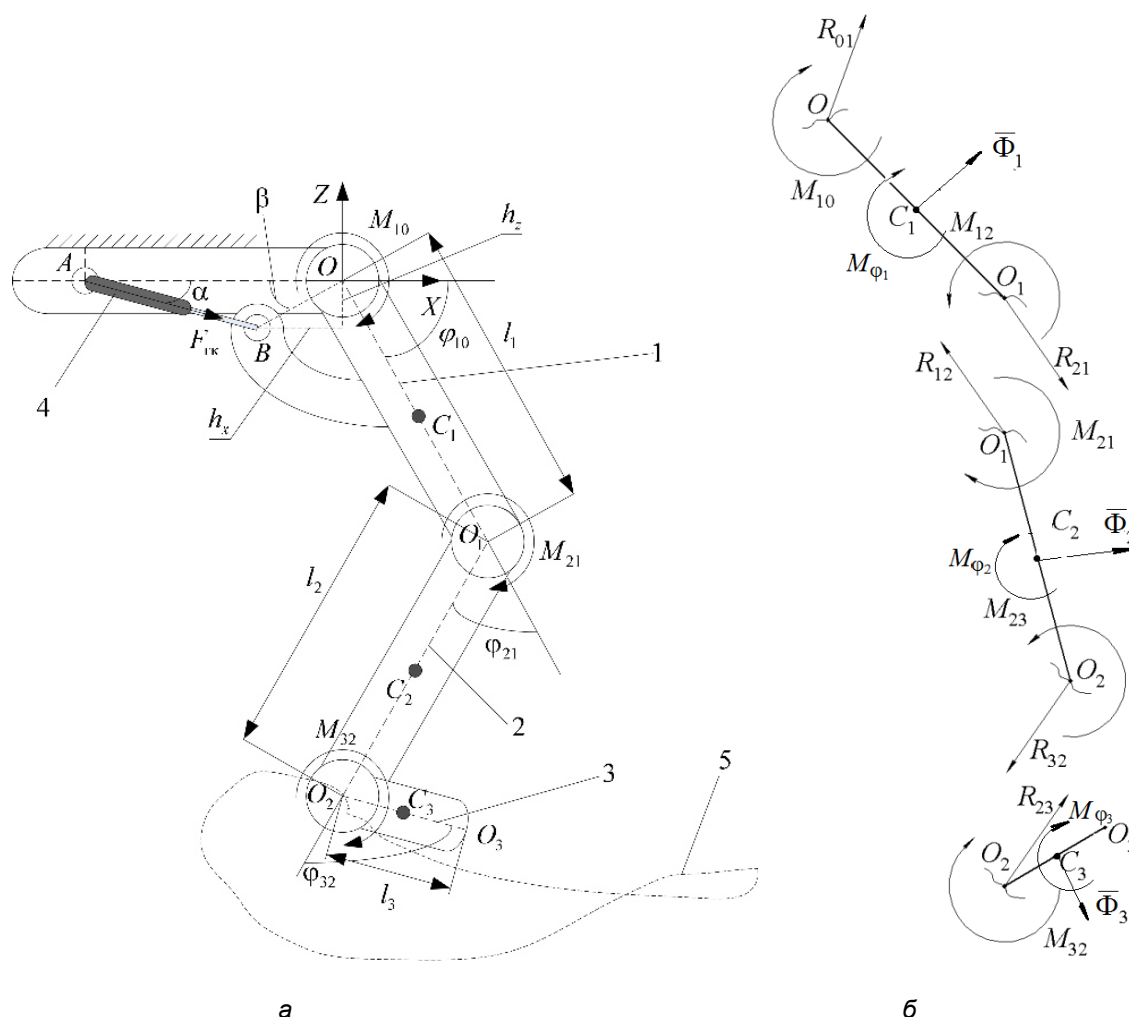


Рис. 2. Расчётная схема реабилитационной экзоскелетной системы нижних конечностей с гибридным приводом в бедренном шарнире (а): 1 – звено бедра; 2 – звено голени; 3 – звено стопы; 4 – линейный гравитационный компенсатор; 5 – желаемая траектория, описываемая голеностопным шарниром; декомпозиция элементов электромеханической многосвязной системы с использованием принципа д’Аламбера (б)

Fig. 2. Calculation scheme of the rehabilitation exoskeleton system of the lower limbs with a hybrid drive in the hip joint (a): 1 – hip link; 2 – lower leg link; 3 – foot link; 4 – linear gravity compensator; 5 – desired trajectory described by the ankle joint; decomposition of elements of an electromechanical multi-link system using d'Alembert's principle (b)

В работах авторов [7; 12; 15] описываются способы получения подобных траекторий, в т. ч. приводятся данные натурного эксперимента с использованием методики видеозахвата при реализации

ходьбы испытуемого по беговой дорожке. В данной работе рассматривается экзоскелетная система нижних конечностей для реабилитации, поэтому траектория движения голеностопного

шарнира имеет замкнутый характер, а алгоритм, описываемый на рисунке 1, имеет рекурсивный характер.

Материалы и методы

Рассмотрим расчётную схему электромеханической реабилитационной

экзоскелетной системы нижних конечностей (рис. 2).

Положения центров масс звеньев электромеханической системы, а также положение характерной точки – голеностопного шарнира O_2 описываются с помощью следующих уравнений:

$$C_1 = (X_{C_1} \quad Z_{C_1})^T = \left(\frac{l_1}{2} \cdot \cos(\varphi_{10}) \quad \frac{l_1}{2} \cdot \sin(\varphi_{10}) \right)^T, \quad (1)$$

$$C_2 = (X_{C_2} \quad Z_{C_2})^T = \left(l_1 \cdot \cos(\varphi_{10}) + \frac{l_2}{2} \cdot \cos(\varphi_{10} + \varphi_{21}) \quad l_1 \cdot \sin(\varphi_{10}) + \frac{l_2}{2} \cdot \sin(\varphi_{10} + \varphi_{21}) \right)^T, \quad (2)$$

$$O_2 = (X_{O_2} \quad Z_{O_2})^T = \left(l_1 \cdot \cos(\varphi_{10}) + l_2 \cdot \cos(\varphi_{10} + \varphi_{21}) \quad l_1 \cdot \sin(\varphi_{10}) + l_2 \cdot \sin(\varphi_{10} + \varphi_{21}) \right)^T, \quad (3)$$

$$C_3 = (X_{C_3} \quad Z_{C_3})^T = O_2 + \left(\frac{l_3}{2} \cdot \cos(\varphi_{10} + \varphi_{21} + \varphi_{32}) \quad \frac{l_3}{2} \cdot \sin(\varphi_{10} + \varphi_{21} + \varphi_{32}) \right)^T. \quad (4)$$

Декомпозиция электромеханической многозвенной системы выполнена с применением принципа д'Аламбера, согласно которому для звена 1

$$\bar{\Phi}_1 + \bar{R}_1 + \bar{F}_1 = 0,$$

$$M_O^F + M_O^R + M_O^\Phi = 0. \quad (5)$$

Сила инерции, действующая на звено 1, может быть определена по формуле $\bar{\Phi}_1 = m\ddot{r}_{C_1}$, или в векторном виде $\bar{\Phi}_1 = (\Phi_{x1} \quad \Phi_{z1})^T$, а вектор $\bar{r}_{C_1} = (X_{C_1} \quad Z_{C_1})^T$.

Момент инерции звена 1 может быть определен по формуле

$$M_{1O}^\Phi = J_{C_1} \ddot{\Phi}_1, \quad (6)$$

где J_{C_1} – момент инерции тела относительно оси y , проходящей через центр масс тела перпендикулярно плоскости движения.

Внешние силы, приложенные к звену 1 системы:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_{C_1} = \sum F_i^x, \\ m\ddot{y}_{C_1} = \sum F_i^y I_{C_1}, \\ I_{C_1} \ddot{\Phi}_{10} = \sum M_{C_1}(F_i), \end{cases} \quad (7)$$

где I_{C_1} – момент инерции звена 1 относительно шарнира O .

Взаимодействие звеньев системы будем оценивать силами реакций и моментами. Отсюда условия сопряжения элементов системы запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} \bar{R}_{01} &= \bar{R}_{10}, \quad \bar{R}_{12} = \bar{R}_{21}, \quad \bar{R}_{23} = \bar{R}_{32}, \\ M_{01} &= M_{10}, \quad M_{12} = M_{21}, \quad M_{23} = M_{32}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для остальных звеньев системы принцип д'Аламбера запишется аналогично с пересчетом на переносную систему координат относительно шарнира O .

Обобщенными координатами являются абсолютные и относительные углы поворота звеньев бедра – 1, голени – 2, стопы – 3. Вектор значений обобщённых координат представим в виде

$\bar{q} = (\varphi_{10}, \varphi_{21}, \varphi_{32})^T$. Здесь $\bar{q}$, $\dot{\bar{q}}$, $\bar{q}_{\text{жел}} = (\varphi_{10\text{жел}}, \varphi_{21\text{жел}}, \varphi_{32\text{жел}})^T$, $\dot{\bar{q}}_{\text{жел}}$ – векторы действительных и желаемых углов и угловых скоростей соответственно.

Сформируем вектор управляющих моментов, воздействующих в соответствующих шарнирах [11]:

$$\begin{pmatrix} \tau_{10} \\ \tau_{21} \\ \tau_{32} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{10}(U_{10}) + M_{\text{ЛГК}}(\varphi_{10}) \\ M_{21}(U_{21}) \\ M_{32}(U_{32}) \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$M_{\text{ЛГК}} = F_{\text{ЛГК}} \cdot |OB| \cdot \cos \left(\arctan \left(\frac{|OB| \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} + \varphi_{10} \right)}{|OB| \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} + \varphi_{10} \right) - X_A} \right) + \varphi_{10} \right), \quad (10)$$

где знак φ_{10} выбирается в зависимости от направления вращения звена 1 относительно горизонтали; «+» – против часовой стрелки; «-» – по часовой.

Математическая модель экзоскелетной системы в виде дифференциальных уравнений в векторно-матричной форме имеет вид

$$M(\bar{q})\ddot{\bar{q}} = (F(\Delta) - V(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) - G(\bar{q}))\bar{R}. \quad (11)$$

Матрица инерции системы рассчитывается согласно [15], где I_{C_1} , I_{C_2} , I_{C_3} – моменты инерции относительно собственной оси каждого из звеньев соответственно; m_i – масса i -го звена электромеханической системы экзоскелета нижних конечностей.

Вектор кориолисовых сил находится из

$$V(\bar{q})\dot{\bar{q}} = \dot{M}(\bar{q})\dot{\bar{q}} - \frac{\partial K(\bar{q}, \dot{\bar{q}})}{\partial \bar{q}}. \quad (12)$$

где τ_{10} – управляющий момент тазобедренного шарнира, состоящий из комбинации двух крутящих моментов [15]: M_{10} – момента электропривода и $M_{\text{ЛГК}}$ – момента, создаваемого гравитационным компенсатором; M_{21} , M_{32} – крутящие моменты, создаваемые электроприводами коленного и голеностопного суставов; φ_{10} – угол отклонения звена 1 от горизонтали. Управляющий момент, создаваемый ЛГК, описывается согласно

Вектор значений гравитационных воздействий рассчитывается исходя из

$$G(\bar{q}) = \frac{\partial P(\bar{q})}{\partial \bar{q}}. \quad (13)$$

Кинематическую связь линейных скоростей центров масс и углов поворота каждого звена можно описать согласно уравнению [17]

$$\bar{V}_{C_i} = J_{V_{C_i}} \dot{\bar{q}}, \quad (14)$$

где $J_{V_{C_i}}$ – матрица Якоби.

Кинетическая и потенциальная энергии электромеханической системы экзоскелета нижних конечностей рассчитываются согласно

$$K(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} m_i \bar{V}_{C_i}^T \bar{V}_{C_i}, \quad (15)$$

$$P(\bar{q}) = \sum_{i=1}^3 m_i g Z_{C_i}. \quad (16)$$

Для решения дифференциальных уравнений (8) используется интегрирование методом Эйлера, позволяющее

вычислить первую производную вектора обобщённых координат и его интеграл:

$$\dot{\bar{q}}_k = \dot{\bar{q}}_{k-1} + \ddot{\bar{q}}_k \cdot \Delta t, \quad (17)$$

$$\begin{pmatrix} U_{10} \\ U_{21} \\ U_{32} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{P_1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{P_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & K_{P_{32}} \end{pmatrix} \cdot (\bar{q}_{\text{жел}} - \bar{q}) + \begin{pmatrix} K_{D_1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{D_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & K_{D_{32}} \end{pmatrix} \cdot (\dot{\bar{q}}_{\text{жел}} - \dot{\bar{q}}), \quad (19)$$

$\bar{q}_{\text{жел}}$ – вектор желаемых обобщённых координат, полученных при видеозахвате голеностопного сустава; $\bar{q}$ – вектор реальных обобщённых координат (18).

Для формирования желаемой траектории движения точки голеностопного шарнира O_2 был проведен натурный эксперимент, в котором испытуемому

$$\bar{q}_k = \bar{q}_{k-1} + \dot{\bar{q}}_k \cdot \Delta t, \quad (18)$$

где Δt – постоянный малый временной промежуток; k – количество итераций.

Вектор управляющих воздействий рассчитывается согласно

человеку было предложено выполнить ходьбу в спокойном режиме [12]. Применялась технология видеозахвата шага человека в сагиттальной плоскости [18]. Видеофрагмент содержал данные о движении ключевых суставов нижних конечностей человека, что позволило восстановить траекторию движения голеностопного сустава (рис. 3).

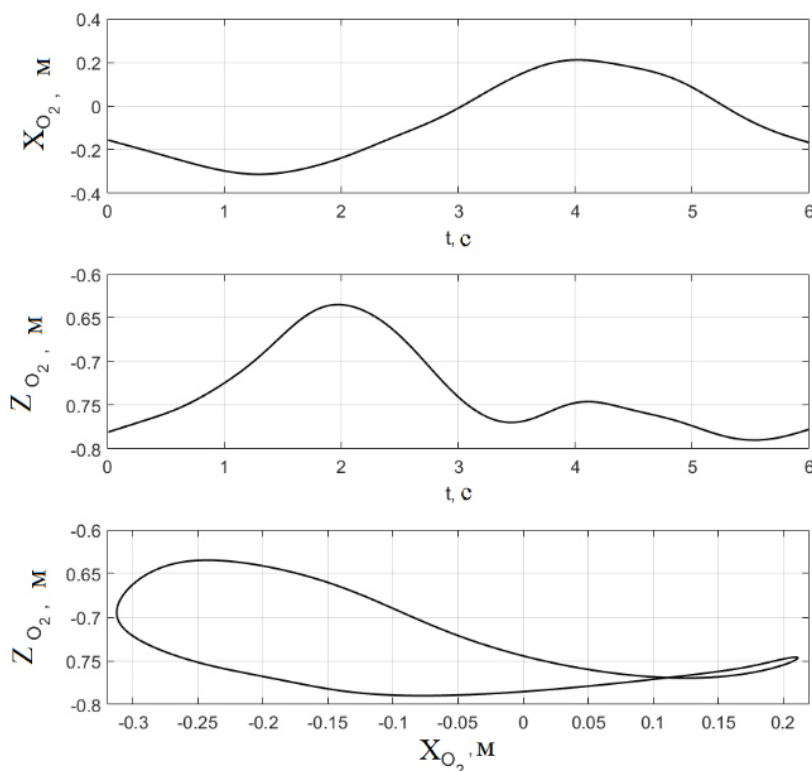


Рис. 3. Графики изменения желаемой траектории движения голеностопного сустава, полученной методом видеозахвата [7]

Fig. 3. Graphs of changes in the desired trajectory of ankle joint movement, obtained by video capture method [7]

Более подробное описание методики восстановления траектории движения ключевых точек по видеофрагменту приводится в других работах [19; 20]. Для удобства исследования авторами принимается допущение, что проекции осей бедренного сустава человека и бедренного шарнира экзоскелетного комплекса в саггитальной плоскости совпадают [12].

Для реализации траекторного управления [8] необходимо вычислить законы изменения желаемых углов (обобщённые координаты) $\bar{q}_{\text{жел}}(t)$ при заданной траектории движения голеностопа. Это значит, что требуется численное решение обратной задачи кинематики (ОЗК). Определим вектор-функцию $\bar{F}(\bar{q})$, которая определяет значения соответствующие проекциям точки O_2 в зависимости от обобщённых координат $\bar{q}$:

$$\bar{F}(\bar{q}) = \bar{r}_{O_2}(\bar{q}). \quad (20)$$

Введем вектор-функцию, зависящую от времени и обратную матрицу Якоби:

$$\bar{\Phi}_F(t) = \bar{r}_{O_2}(t), \quad (21)$$

$$J^{-1} = \frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{q}}. \quad (22)$$

Тогда в дискретной форме выражение для решения ОЗК будет иметь вид

$$\bar{q}_{\text{жел}}^{k+1} = \bar{q}^k + J^{-1} \Delta \bar{\Phi}_F(t), \quad (23)$$

где $\Delta \bar{\Phi}_F(t)$ – приращение функции $\bar{\Phi}_F(t)$ на временном шаге Δt .

Полученное соотношение позволяет находить вектор желаемых обобщённых координат $\bar{q}_{\text{жел}}$ на $k+1$ -м временном шаге по известному значению $\bar{q}$ на k -м шаге.

Рассмотрим результаты решения ОЗК в виде графика изменения желаемых обобщённых координат (рис. 4).

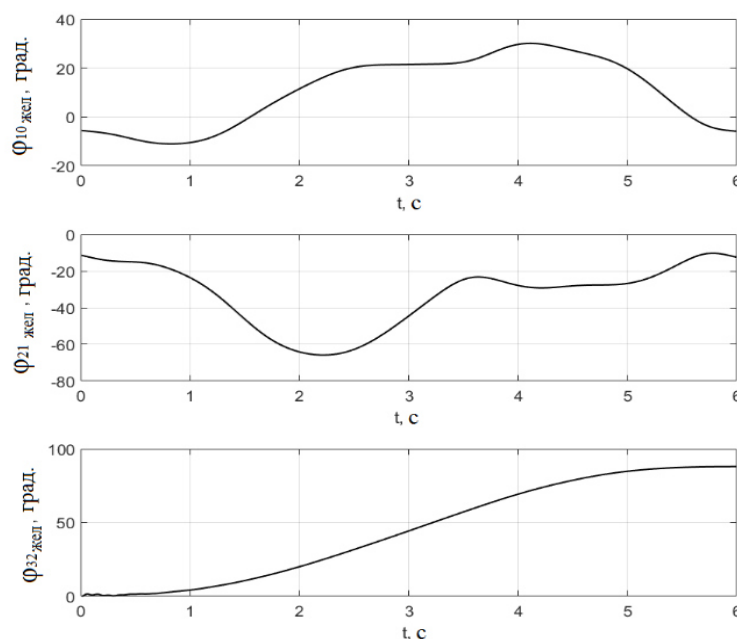


Рис. 4. Графики изменения желаемых углов поворота звеньев

Fig. 4. Graphs of changes in the desired rotation angles of the links

Рисунок 4 иллюстрирует решение ОЗК и определение законов изменения желаемых углов для реализации траекторного управления

Результаты и их обсуждение

Применение описанных выше методов позволило определить такие параметры управления, которые позволяют выполнять реабилитационной системе экзоскелетного комплекса нижних конечностей антропоморфный шаг [21]. Экзоскелетная система оснащена

гибридным приводом бедренного шарнира. Рисунок 4 иллюстрирует возможности системы по реализации траекторного управления с ошибкой, не превышающей 0,015 м. На рисунке 5 рассматривается траектория движения голеностопного шарнира только одной нижней конечности экзоскелетной системы. Принято считать, что траектория движения голеностопного шарнира второй конечности идентична, что позволяет не отражать эти данные.

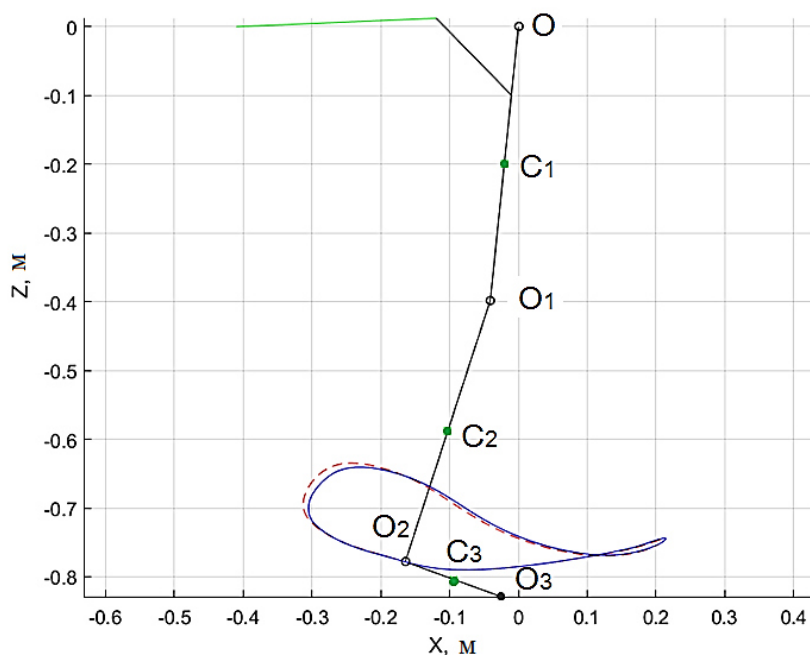


Рис. 5. Кадр анимации траекторного управления положением голеностопного шарнира многосвязной электромеханической экзоскелетной системы нижних конечностей с гибридным приводом

Fig. 5. Animation frame of the trajectory control of the ankle joint position of a multi-link electromechanical exoskeleton system of the lower limbs with a hybrid drive

Остановимся более подробно на результатах силомоментного анализа системы. На рисунке 6 сплошные линии –1 отражают графики изменения требуемых крутящих моментов для отработки углов. Сплошной линией –2 отражены

графики изменения крутящих моментов при использовании описанного ЛГК. Как ожидалось, на коленный и голеностопный шарниры ЛГК не оказал влияния [15]. Однако видно, что пиковые значения моментов в бедренном шарнире снизились.

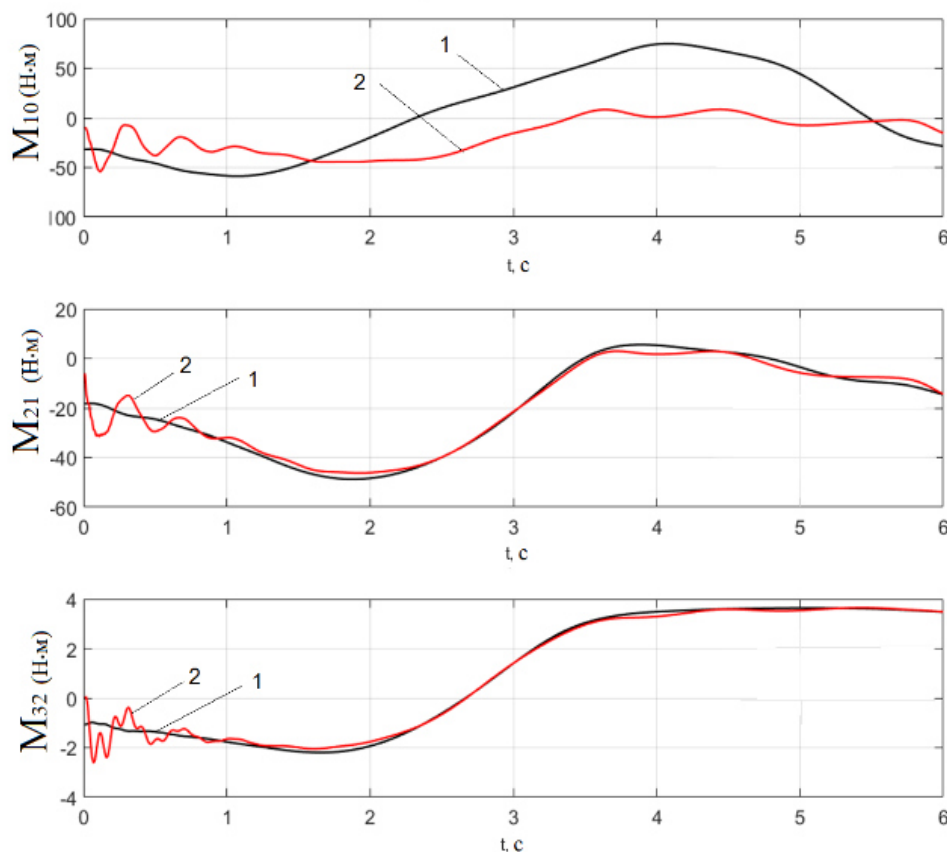


Рис. 6. Графики изменения требуемых крутящих моментов:
1 – без использования ЛГК; 2 – с использованием ЛГК

Fig. 6. Graphs of changes in required torques: 1 – without the use of LGC;
2 – with the use of LGC

Анализируя графики на рисунке 6, видно, что применение ЛГК позволяет снизить пиковый крутящий момент в бедренном шарнире в положительной зоне на 88,41%, однако в отрицательной зоне сокращение составляет всего 7,39%.

Полученные графики изменения крутящего момента во времени в шарнирах O_1 и O_2 демонстрируют более гладкую траекторию изменения моментов M_{21} и M_{32} при применении гибридного привода с гравитационным компенсатором в отличие от того случая, когда гравитационный компенсатор не применя-

ется. Применение гибридного привода позволяет снизить колебания требуемых значений крутящих моментов в указанных шарнирах, что будет способствовать более эффективному управлению работой системы и положительно скажется на сроке службы приводных компонентов электромеханической системы.

С помощью вычисленных значений моментов M_{10} , M_{21} и M_{32} можно рассчитать токи, потребляемые приводами согласно

$$I_1 = \frac{M_{10}}{C_m \cdot u}, \quad (24)$$

где I_1 – требуемый ток; C_m – моментная постоянная двигателя; u – передаточное число редуктора.

Выводы

Математическое моделирование взаимодействия звеньев электромеханической многосвязной системы экзоскелета нижних конечностей позволяет сделать вывод о том, что линейный гравитационный компенсатор, примененный в гибридном приводе бедренного звена нижней конечности, позволяет повысить эффективность работы многосвязной системы в целом. Применение гибридного привода указанной конструкции снижает колебания требуемых значений крутящих моментов в указанных шарнирах, что способствует более эффективному управлению положением звеньев электромеханической системы.

Результаты моделирования подтверждают, что использование линейного гравитационного компенсатора в гибридном приводе снимает часть нагрузки, оказываемой на электрический привод в бедренном шарнире О при выполнении движения по заданной траектории. В шарнирах O_1 и O_2 при применении гибридного привода в шарнире О исключен колебательный характер значений крутящего момента.

Разработка гибридных приводов и применение новых материалов и технологий могут стать ключевыми факторами, способствующими дальнейшему развитию и усовершенствованию технологии проектирования реабилитационных экзоскелетных систем и повышению эффективности разрабатываемых реабилитационных систем.

Список литературы

1. Котов Е. А., Друк А. Д., Клыпин Д. Н. Разработка экзоскелета нижних конечностей человека для медицинской реабилитации // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 91–97. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2021-178-91-97>
2. Оценка эффективности восстановления навыков ходьбы с помощью реабилитационного роботизированного комплекса / И. Э. Юденко, А. И. Попова, Ю. Е. Викторова, Н. В. Минникаева // Северный регион: наука, образование, культура. 2023. № 3(55). С. 77–83.
3. Смирнова Л. М. Комплексное поэтапное моделирование биотехнической системы при оценке эффективности и настройке протеза нижней конечности // Информационно-управляющие системы. 2009. № 3. С. 29–33.
4. Simulation of Interaction between an Operator and an Exoskeleton / S. F. Yatsun, A. S. Yatsun, E. V. Savel'eva, A. E. Karlov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. N 49. P. 490–499.

5. Samsonov I., Taratonov I. Modular Scalable System for Registration of Biomedical Indicators of Activity of the Exoskeleton User // *Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software*. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 647–655.
6. Studying of copying control system with nonlinear measurer / S. Jatsun, A. Malchikov, A. Yatsun, E. Saveleva // *Electromechanics and Robotics: Proceedings of 16th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" (ER (ZR) 2021)*, St. Petersburg, Russia, 14–17 April 2021. Singapore: Springer, 2022. P. 13–23.
7. Князев А. А., Яцун С. Ф., Федоров А. В. Управление прибором для механотерапии голеностопного сустава // *Медицинская техника*. 2022. № 6 (336). С. 14.
8. Системный анализ и управление в биомедицинских системах / Н. А. Корневский, С. Н. Родионова, Л. В. Стародубцева, Н. А. Милостная, Е. Н. Корневская // *Системный анализ и управление в биомедицинских системах*. 2022. Т. 21, № 3. С. 75–89.
9. Samsonov I., Taratonov I. Modular Scalable System for Registration of Biomedical Indicators of Activity of the Exoskeleton User // *Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software*. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 647–655.
10. Смирнова Л. М., Пономаренко Г. Н., Сусяев В. Г. Методология и информационно-измерительная система для персонифицированного синтеза протезов нижних конечностей // *Информационно-управляющие системы*. 2021. № 6. С. 64–74. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-64-74>
11. Varlamova L. P., Farukh N. Xo'jaqulov. Simulation of a two-link manipulator // *Scientific Progress*. 2022. N 3. P. 1107–1111.
12. Simulation of static walking in an exoskeleton / S. Jatsun, A. Yatsun, A. Fedorov, E. Saveleva // *Electromechanics and Robotics: Proceedings of 16th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" (ER (ZR) 2021)*, St. Petersburg, Russia, 14–17 April 2021. Singapore: Springer, 2022. P. 49–60.
13. Zaichenko K. V., Gurevich B. S. Spectral processing of bioelectric signals // *Medical equipment*. 2021. N 1 (325). P. 12–14.
14. Modelling for design and evaluation of industrial exoskeletons: A systematic review / T. Ma, Y. Zhang, S. D. Choi, S. Xiong // *Applied Ergonomics*. 2023. N 113. P. 104100.
15. Analysis of the effect of the exoskeleton geometrical dimensions on the nature of a linear compensator operation / S. F. Jatsun, V. E. Pavlovsky, A. E. Karlov, M. Al MajiKhKh, A. S. Yatsun, E. V. Saveleva // *12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*. Kazan: IEEE, 2020. P. 466–471.
16. Evaluation of the EEG identification potential using a statistical approach and convolutional neural networks / A. E. Sulavko, P. S. Lozhnikov, A. G. Choban, D. G. Stadnikov,

A. A. Nigrey, D. P. Inivatov // *Information and control systems*. 2020. N 6. P. 37–49.
<https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-6-37-49>

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

18. Исследование устройства нечеткого цифрового фильтра для робота-манипулятора / М. В. Бобырь, Н. А. Милостная, В. А. Булатников, М. Ю. Лунева // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2020. Т. 24, № 1. С. 115–129.

19. Титов В. С., Бобырь М. В., Милостная Н. А. Особенности оценки точности измерений размеров при использовании высокоточных автоматизированных систем // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2005. № 6. С. 17–19.

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

21. Бобырь М. В., Милостная Н. А. Нечеткая модель интеллектуальной системы управления мобильным роботом // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2015. № 3. С. 57–67.

References

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

2. Yudenko I.E., Popova A.I., Viktorova Yu.E., Minnikaeva N.V. Evaluation of the effectiveness of restoring walking skills using a rehabilitation robotic complex. *Severnyi region: nauka, obrazovanie, kul'tura = The Northern Region: Science, Education, Culture*. 2023;(3):77–83. (In Russ.)

3. Smirnova L.M. Complex step-by-step modeling of a biotechnical system in evaluating the effectiveness and configuration of a lower limb prosthesis. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*. 2009;(3):29–33. (In Russ.)

4. Yatsun S.F., Yatsun A.S., Savel'eva E.V., Karlov A.E. Simulation of Interaction between an Operator and an Exoskeleton. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020;(49):490–499.

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

6. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A., Saveleva E. Studying of copying control system with nonlinear measurer. In: *Electromechanics and Robotics: Proceedings of the 16th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" (ER (ZR) 2021), 14–17 April 2021, St. Petersburg, Russia*. Singapore: Springer; 2022. P. 13–23.
7. Knyazev A.A., Yatsun S.F., Fedorov A.V. Device control for ankle joint surgery. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = Medical Equipment*. 2022;(6):14. (In Russ.)
8. Korenevsky N.A., Rodionova S.N., Starodubtseva L.V., Milostnaya N.A., Korenevskaya E.N. System analysis and management in biomedical systems. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = Systems Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2022;21(3):75–89. (In Russ.)
9. Samsonov I., Taratonov I. Modular Scalable System for Registration of Biomedical Indicators of Activity of the Exoskeleton User. In: *Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software*. Cham: Springer International Publishing; 2022. P. 647–655.
10. Smirnova L.M., Ponomarenko G.N., Suslyayev V.G. Methodology and information and measurement system for personalized synthesis of lower limb prostheses. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*. 2021;(6):64–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-64-74>
11. Varlamova L.P., Farukh N. Xo'jaqulov. Simulation of a two-link manipulator. *Scientific Progress*. 2022;(3):1107–1111.
12. Jatsun S., Yatsun A., Fedorov A., Saveleva E. Simulation of static walking in an exoskeleton. In: *Electromechanics and Robotics: Proceedings of 16th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" (ER (ZR) 2021), 14–17 April 2021, St. Petersburg, Russia*. Singapore: Springer; 2022. P. 49–60.
13. Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Spectral processing of bioelectric signals. *Medical Equipment*. 2021;(1):12–14.
14. Ma T., Zhang Y., Choi S. D., Xiong S. Modelling for design and evaluation of industrial exoskeletons: A systematic review. *Applied Ergonomics*. 2023;(113):104100.
15. Jatsun S.F., Pavlovsky V.E., Karlov A.E., MajiKhKh M.A.I., Yatsun A.S., Saveleva E.V. Analysis of the effect of the exoskeleton geometrical dimensions on the nature of a linear compensator operation. In: *12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*. Kazan: IEEE; 2020. P. 466–471.
16. Sulavko A.E., Lozhnikov P.S., Choban A.G., Stadnikov D.G., Nigrey A.A., Inivatov D.P. Evaluation of the EEG identification potential using a statistical approach and convolutional neural networks. *Information and Control Systems*. 2020;(6):37–49. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-6-37-49>

17. Kust S.Yu., Markova M.V., Pisareva A.V. Development of an algorithm for determining terrain in a lower limb prosthesis control system. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = Systems Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2021;20(2):99–105. (In Russ.)

18. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Bulatnikov V.A., Luneva M.Y. Investigation of a fuzzy digital filter device for a robot manipulator. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020;24(1):115–129. (In Russ.)

19. Titov V.S., Bobyr M.V., Milostnaya N.A. Features of estimating the accuracy of dimensional measurements using high-precision automated systems. *Promyshlennyye ASU i kontroly = Industrial Automated Control Systems and Controllers*. 2005;(6):17–19. (In Russ.)

20. Provotorov N.V., Taratonov I.N., Filippovich Yu.N. Method of intersegmental assessment of the allocation of motion patterns from kinematic trajectories recorded by means of an exoskeletal system. *Programmnyye produkty i sistemy = Software Products and Systems*. 2022;35(3):493–501. (In Russ.)

21. Bobyr M.V., Milostnaya N.A. Fuzzy model of an intelligent control system for a mobile robot. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii = Problems of Mechanical Engineering and Automation*. 2015;(3):57–67. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

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

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

Печурин Александр Сергеевич, преподаватель кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alexander.pechurin@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1615-7817

Alexander S. Pechurin, Lecturer of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: alexander.pechurin@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1615-7817

Савельева Екатерина Владимировна,

преподаватель кафедры механики, мехатроники
и робототехники, Юго-Западный

государственный университет,

г. Курск, Российская Федерация,

e-mail: katyasavelkursk@yandex.ru,

Researcher ID: 1147373,

ORCID: 0000-0002-7420-0772

Ekaterina V. Saveleva, Lecturer

of the Department of Mechanics, Mechatronics
and Robotics, Southwest State University,

Kursk, Russian Federation,

e-mail: katyasavelkursk@yandex.ru,

Researcher ID: 1147373,

ORCID: 0000-0002-7420-0772

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-221-232>



УДК 616.21

Разработка алгоритма диагностики эндотелиальной дисфункции у больных с хроническим риносинуситом

Д. В. Трусов^{1,3} ✉, Т. И. Субботина², Н. К. Починина³

¹ Тамбовская областная клиническая больница имени В. Д. Бабенко
ул. Московская, д. 29, г. Тамбов 392000, Российская Федерация

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

³ Пензенский институт усовершенствования врачей – филиал Российской медицинской академии
непрерывного профессионального образования Министерства здравоохранения
ул. Стасова, д. 8А, г. Пенза 440060, Российской Федерации

✉ e-mail: trudoc747@rambler.ru

Резюме

Цель исследования. Проблематика загруженности врачей при увеличении объема информатизации в медицине может быть решена посредством реализации диагностических алгоритмов. Интегральный подход в работе врача включает не только осмотр больного, сбор анамнеза, но и результаты клиничко-лабораторных и лучевых методов исследования. Цель исследования – совершенствование алгоритма диагностики больного ХРС с применением математической модели.

Методы. При составлении алгоритма обследования применялись требования ГОСТ 19.701-90. В качестве математического метода построения математической модели использовалась логистическая регрессия. Для построения математической модели также применялись корреляционный анализ, ROC- анализ.

Результаты всего комплекса обследования больного должны вноситься в медицинскую информационную систему и интегрированы в систему поддержки принятия врачебных решений. По результатам расчета по математической модели у пациента констатируется наличие или отсутствие клиничко-лабораторных проявлений эндотелиальной дисфункции. В зависимости от полученного результата строится тактика дальнейшего лечения больного.

Заключение. Предложен алгоритм обследования больного с ХРС с применением математической модели. Такой подход сокращает время для обработки полученных данных для врача и принятия решения о дальнейшей тактике ведения больного. Разработанный алгоритм может применяться не только с диагностической целью, но и для мониторинга лечения больных с хроническим риносинуситом. Применение алгоритма можно рекомендовать использовать его врачам поликлиник и стационаров. Такая тактика обследования пациента сокращает время обработки полученных данных для врача и принятия решения о дальнейшей тактике ведения больного. Математическая модель не позволяет точно поставить диагноз, а только оценивает вероятность наличия заболевания. Для постановки диагноза необходимо проведение различных клинических данных.

Ключевые слова: хронический риносинусит; алгоритм; математическая модель; логистическая регрессия; ROC-анализ.

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

Для цитирования: Трусов Д. В., Субботина Т. И., Починина Н. К. Разработка алгоритма диагностики эндотелиальной дисфункции у больных с хроническим риносинуситом // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 2. С. 221–232. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-221-232>

Поступила в редакцию 11.04.2025

Подписана в печать 10.05.2025

Опубликована 30.06.2025

Development of an algorithm for diagnosing endothelial dysfunction in patients with chronic rhinosinusitis

Dmitry V. Trusov^{1,3} ✉, Tatyana I. Subbotina², Natalia K. Pochinina³

¹ Tambov Regional Clinical Hospital named after V. D. Babenko
29 Moskovskaya Str., Tambov 392000, Russian Federation

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

³ Penza Institute of Advanced Medical Training is a branch of the Russian Medical Academy of Continuing Professional Education of the Ministry of Health of the Russian Federation
8A Stasov Str., Penza 440060, Russian Federation

✉ e-mail: trudoc747@rambler.ru

Abstract

Purpose of research. The problem of workload of doctors with an increase in the volume of informatization in medicine can be solved through the development of diagnostic algorithms. The integral approach in the work of a doctor includes not only examining the patient, collecting anamnesis, but also taking into account the results of clinical laboratory and radiation research methods.

The purpose of the research is to improve the algorithm for diagnosing a patient with chronic rhinosinusitis using a mathematical model.

Methods. When compiling the examination algorithm, the requirements of GOST 19.701-90 were applied. Logistic regression was used as a mathematical method for constructing a mathematical model. Correlation analysis and ROC analysis were also used to build a mathematical model.

Results. The results of the entire complex of examination of the patient should be entered into the medical information system and integrated into the medical decision support system. According to the results of the calculation using a mathematical model, the patient is diagnosed with the presence or absence of clinical and laboratory manifestations of endothelial dysfunction. Depending on the result obtained, the tactics of further treatment of the patient are built.

Conclusion. An algorithm for examining a patient with chronic rhinosinusitis using a mathematical model is proposed. This approach reduces the time for processing the received data for the doctor and making a decision on further patient management tactics. The developed algorithm can be used not only for diagnostic purposes, but also for monitoring the treatment of patients with chronic rhinosinusitis. The use of the algorithm can be recommended to doctors of polyclinics and hospitals. This tactic of examining the patient reduces the processing time of the received data for the doctor and making a decision on further patient management tactics. The mathematical model does not provide an accurate diagnosis, but only estimates the likelihood of the disease. Various clinical data are also needed to make a diagnosis.

Keywords: chronic rhinosinusitis; algorithm; mathematical model; logistic regression; ROC analysis.

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

For citation: Trusov D.V., Subbotina T.I., Pochinina N.K. Development of an algorithm for diagnosing endothelial dysfunction in patients with chronic rhinosinusitis. *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*. 2025;15(2):221–232. (In Russ.) [https://doi.org/ 10.21869/2223-1536-2025-15-2-221-232](https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-221-232)

Received 11.04.2025

Accepted 10.05.2025

Published 30.06.2025

Введение

Длительное время медицину считали неточной наукой. С внедрением медицинской статистики и развитием доказательной медицины эти представления стали опровергаться [1]. Внедрение в работу медицинских работников диагностических комплексов с программным обеспечением и лабораторных анализаторов значительно повысило точность диагностики и результатов обследования пациента [2]. Медицина – сложная наука, ежегодно знания в ней умножаются, в связи с этим нагрузка на врачей увеличивается. Интеллектуальная перегрузка врачей может оказаться сверх сил. Для решения вопроса с обработкой такого количества информации требуется научная основа в виде эргономики [3]. Поэтому для хранения такого количества информации и автоматической обработки медицинской статистики разработаны и внедрены в практику врача медицинские информационные системы (МИС). Работа с их помощью может быть оптимизирована в медицинских учреждениях [4]. В МИС могут быть интегрированы системы поддержки принятия врачебных решений (СПВР) [5]. Реализация работы СПВР основана на построении четких алгоритмов в каждом конкретном случае (диагностическом блоке, лечебном мероприятии и т. д.). В

медицине существует профессиональный язык, изложенный в специальной литературе, используемый для стандартов, протоколов и клинических рекомендаций. Для единого понимания этой информации и четкости действий медицинских работников требуется алгоритмизация медицинского языка [6].

В XX веке с появлением ЭВМ и массовой информатизацией термин «алгоритм» приобрел значение инструмента для последовательного четкого решения конкретных задач. Алгоритмы могут быть словесными, формульными, в виде схем [3]. Построение алгоритмов осуществляется по правилам ГОСТ 19.701-90 [3].

Алгоритмы обязаны своим появлением математике – точной науке, соответственно должны иметь такие свойства, как: дискретность, определенность, результативность и универсальность [3]. Но медицинские алгоритмы имеют свои особенности, так как объектом для их выполнения является живой организм, поэтому медицинские алгоритмы развернуты во времени и не всегда могут быть выполнены одномоментно. Кроме того, не всегда работа алгоритма может завершиться на конечном блоке, иногда требуется коррекция для получения результата, а может быть и вовсе отмена всего процесса. К тому

же построение алгоритма в виде блок-схем не может быть универсальным для медицины, и в процессе изучения такого алгоритма требуется обращаться к сопроводительному тексту за разъяснением [3]. Для построения медицинских алгоритмов может применяться язык ДРАКОН, который был разработан для запуска космических кораблей. Расшифровывается аббревиатура ДРАКОН как Дружелюбный Русский Алгоритмический язык, Который Обеспечивает Наглядность. По сравнению с ГОСТ 19.701-90, в блоках ДРАКОН можно поместить текст, который не вмещается в ромбы ГОСТа, хотя правила построения блок-схем схожи [3].

Алгоритм – это способ последовательного решения задач, обеспечивающих варианты лечения (принятия решения) [7]. Для решения такой задачи сначала нужно поставить диагноз, а для этого необходимы различные клинические данные [8]. Далее, в ходе обследования пациента, полученные данные анализируются и могут быть внесены в диагностическую математическую модель. Математическая модель является одной из ключевых в построении алгоритма, который, в свою очередь, входит в систему СППВР [2], так как числовой результат расчета по математической модели помогает врачу в оценке и предлагает варианты действий [9]. На основе алгоритма и математической модели можно также оценивать динамику интенсивности проявления заболевания [10]. Одна из основных задач в построении математической модели – это правильный выбор предикторов [11]. Выбор

предикторов должен быть обоснован критериями значимости и информативности [12]. Прогноз выздоровления и эффективности проводимого лечения / исхода заболевания зависит от большого количества факторов, которые не всегда можно учесть [13].

С внедрением математических методов для обработки статистических данных в медицине появилась возможность на их основе прогнозировать развитие и исход заболеваний [14]. Одним из таких методов является логистическая регрессия [15]. Логистическая регрессия используется для решения задач бинарного типа, т. е. для прогнозирования наступления какого-либо события (например, болен / здоров) [16]. Логистическая регрессия имеет свои ограничения применения. Одним из них является отсутствие мультиколлинеарности [17], так как мультиколлинеарность может исказить интерпретацию результата [18].

Далее, с помощью ROC-анализа возможно рассчитать порог отсечения, т. е. найти диагностический порог, который указывает на отделение одной группы от другой (есть заболевание / нет заболевания) [19].

Материалы и методы

Построение алгоритма с помощью блок-схем выполнено соответственно требованиям ГОСТ 19.701-90 [3]. В качестве математического метода построения математической модели использовалась логистическая регрессия. Расчет осуществлялся по уравнению

$$P = \frac{1}{1 + e^{-z}},$$

где P – вероятность того, что произойдет интересующее событие; e – основание натуральных логарифмов 2,71...; z – стандартное уравнение регрессии.

$z = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_k x_k$,
где β_0 – точка пересечения; $\beta_1, \beta_2, \beta_3 \dots$ и т. д. – коэффициенты регрессии для предикторов $x_1, x_2, x_3 \dots$ соответственно.

Для построения математической модели также применялись корреляционный анализ, ROC- анализ [20].

Результаты и их обсуждение

Работа алгоритма построена на междисциплинарном подходе в диагностике больных с хроническим риносинуситом. Последовательность диагностических мероприятий включает в себя осмотр врачом-оториноларингологом. Осмотр лор-органов обязательно осуществляется с помощью эндоскопического оборудования. Назначаются дополнительно лучевые методы диагностики (рентгенография, компьютерная томография или магнитно-резонансная томография околоносовых пазух). Оценка и интерпре-

тация результатов лучевых методов исследования проводится совместно с врачом-рентгенологом.

Далее выполняется забор биоматериала для исследования (образцы периферической венозной крови, отделяемой из носовых ходов). В анализах крови, кроме стандартных общеклинических методов исследования, мы в своем исследовании определяли уровни высокочувствительных биомаркеров эндотелиальной дисфункции (гомоцистеина, цистатина С, высокочувствительного С-реактивного белка (вчСРБ) и Д-димера).

Полученные результаты подвергли статистическому анализу. В нашем исследовании наиболее значимыми независимыми факторами-предикторами прогноза являлись гомоцистеин, цистатин С, высокочувствительный С-реактивный белок и Д-димер. Предварительно проведена описательная статистика. Далее проведен корреляционный анализ полученных данных по каждому биомаркеру на предмет выявления взаимосвязи их с заболеванием (ХРС). Результаты анализа представлены ниже (табл. 1).

Таблица 1. Данные корреляционного анализа биомаркеров с группой заболевания у пациентов с ХРС

Table 1. Data from the correlation analysis of biomarkers with the disease group in patients with CRS

Показатель	Коэффициент корреляции	Уровень достоверности
вчСРБ	$r = 0,376$	$p = 0,000$
Гомоцистеин	$r = 0,728$	$p = 0,000$
Цистатин С	$r = 0,712$	$p = 0,000$
Д-димер	$r = 0,779$	$p = 0,000$

Учитывая выявленную корреляционную зависимость между исследуемыми биомаркерами и кодом группы, для построения прогностической математической модели и получения количественной оценки был выбран один из наиболее распространённых методов анализа данных – логистическая регрессия (ЛР), которая используется для описания взаимосвязей между переменными. Результаты клинико-лабораторных методов исследования вводят в формулу математической модели и проводят расчет с соответствующими коэффициентами:

$$z = -50,1607 + 0,0865 \cdot x_1 + \\ + -0,0579 \cdot x_2 + 1,1252 \cdot x_3 + 0,0209 \cdot x_4,$$

где x_1 – Д-димер, нг/мл; x_2 – вЧСРБ мг/л; x_3 – гомоцистеин, мкмоль/л; x_4 – цистатин С, нг/мл.

Для оценки диагностической значимости модели проведен метод анализа ROC-кривых. Площадь под ROC-кривой (AUC) равна 0,99, что свидетельствует о высокой эффективности модели в задаче классификации «здоровый» (0) и «больной» (1), корректно классифицируя 99% случаев.

Для нахождения оптимального порога отсечения использовали метрику F1-Score. Из рисунка 1 видно, что график F1-Score по различным порогам отображен зеленой линией. Оптимальный порог указан красной вертикальной линией и равен 0,3864.

Оценка производительности модели при пороге отсечения, равном 0,3864,

имеет следующие характеристики: чувствительность – 99,6%, специфичность – 100%, точность – 100%.

Таким образом, при значении результата расчета $< 0,3864$ констатируют у пациента отсутствие клинико-лабораторных проявлений эндотелиальной дисфункции, при $\geq 0,3864$ – наличие у пациента клинико-лабораторных проявлений эндотелиальной дисфункции.

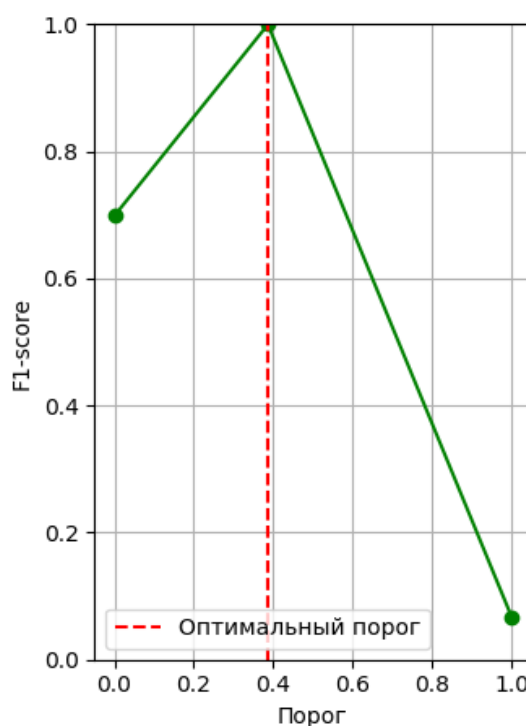


Рис. 1. График F1-Score

Fig. 1. F1-Score Graph

По полученному результату расчета о наличии или отсутствии клинико-лабораторных признаков эндотелиальной дисфункции принимают решение о тактике ведения больного. Применение алгоритма врачом на практике выполняется в следующей последовательности (рис. 2):

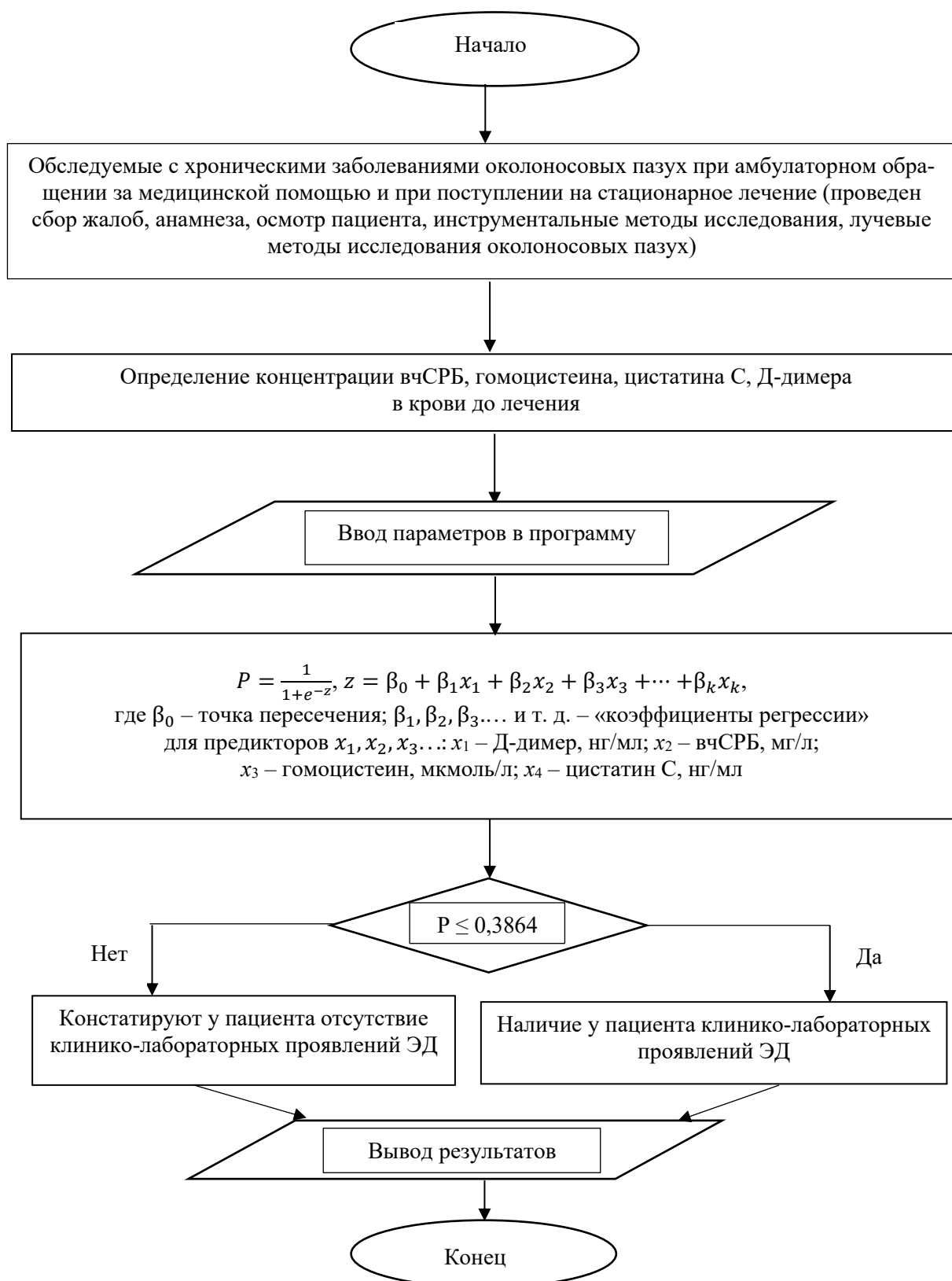


Рис. 2. Алгоритм клинико-лабораторного обследования больного хроническим риносинуситом для диагностики эндотелиальной дисфункции

Fig. 2. Algorithm of clinical and laboratory examination of a patient with chronic rhinosinusitis for the diagnosis of endothelial dysfunction

1. Осмотр и обследование врачом-оториноларингологом.

2. Выполняется забор периферической крови, в которой определяются концентрации биомаркеров эндотелиальной дисфункции.

3. Результаты анализов заносятся в интегрированную в МИС компьютерную программу для расчета по указанной в алгоритме формуле.

4. Алгоритм клинико-лабораторного обследования больных с ХРС.

Забор биологического материала для обследования больного необходимо осуществлять до начала лечения и после проведенного лечения. Разработанный алгоритм применяется как для диагностики у больных хроническим риносинуситом, так и для мониторинга лечения этой категории больных. Согласно этому алгоритму не принимается решение о хирургическом лечении больного, для этой цели существуют другие критерии. Алгоритм необходим для диагностики одного из патогенетических звеньев развития заболевания и своевременной коррекции лечения. Мониторинг лечения больных ХРС необходим для прогнози-

рования риска рецидивирования заболевания.

Выводы

1. Определены цель и необходимость алгоритмизации обследования пациента с ХРС.

2. Предложен диагностический алгоритм на основе биомаркеров эндотелиальной дисфункции с применением математической модели для обработки данных обследования.

Разработанный алгоритм может применяться не только с диагностической целью, но и для мониторинга лечения больных с хроническим риносинуситом. Применение алгоритма можно рекомендовать использовать его врачам поликлиник и стационаров. Такая тактика обследования пациента сокращает время обработки полученных данных для врача и принятия решения о дальнейшей тактике ведения больного.

С помощью математической модели можно оценить вероятность наличия заболевания. Для постановки диагноза необходимо также различные клинические данные.

Список литературы

1. Математика в медицине / Т. Н. Черняева, А. А. Никифорова, С. С. Маслова, Л. Д. Мазур // Столыпинский вестник. 2022. № 10. С. 1–13.
2. Разработка алгоритма работы логического решателя интеллектуальной системы поддержки принятия врачебных решений для инструментальной диагностики стенокардии / К. В. Киселев, Е. А. Ноева, О. Н. Выборов [и др.] // Медицинские технологии. Оценка и выбор. 2019. № 1(35). С. 32–42. <https://doi.org/10.31556/2219-0678.2019.35.1.032-042>
3. Паронджанов В. Д. Учись писать, читать и понимать алгоритмы. Алгоритмы для правильного мышления. Основы алгоритмизации. 2-е изд. М.: ДМК Пресс, 2016. 520 с.

4. Разработка алгоритма автоматизированного вейвлет-анализа данных о работе регистратуры клинического онкологического диспансера на региональном уровне / К. В. Собченко, А. В. Коваленко, А. А. Кошкарров [и др.] // Врач и информационные технологии. 2018. Октябрь. С. 66–73.

5. Михеев А. Е. Подход к внедрению систем поддержки принятия врачебных решений на принципах сервис-ориентированной архитектуры с использованием сервисов цифровой медицинской экосистемы // Менеджер здравоохранения. 2024. № S. С. 101–118. <https://doi.org/10.21045/1811-0185-2024-S-101-118>

6. Котонский И. Н., Малина Ю. В. Метод частных алгоритмов действий врача как способ адаптации клинических рекомендаций в медицинской практике // Медицинские технологии. Оценка и выбор. 2022. № 44 (1). С. 9–14. <https://doi.org/10.17116/medtech2022440119>

7. Фонг Н. Алгоритмы дифференциальной диагностики. Общие жалобы у взрослых пациентов / под ред. А. А. Скоромца. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2022. 680 с.

8. Меры информативности диагностических медицинских технологий в оториноларингологии: вычисление и интерпретация / А. А. Корнеев, С. В. Рязанцев, Е. Э. Вяземская, М. А. Будковая // Российская оториноларингология. 2020. № 19 (1). С. 46–55. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2020-1-46-55>

9. Габбасов А. А. Математическое моделирование биологических процессов в медицине // Вестник науки. 2024. Т. 5, № 12 (81), ч. 1. С. 914–922.

10. Корнеев А. А., Фанта И. В., Вяземская Е. Э. Оценка динамики симптомов болезни методами анализа выживаемости // Российская оториноларингология. 2019. № 18 (4). С. 8–14. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2019-4-8-14>

11. Использование кластерного анализа и логистической регрессии для оценки риска болезни Альцгеймера у пациентов с синдромом мягкого когнитивного снижения амнестического типа / А. Н. Симонов, Т. П. Ключник, Л. В. Андросова, Н. М. Михайлова // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. 2018. № 118 (12). С. 40–43.

12. Heinze G., Wallish K., Dunkler D. Variable selection is an overview and recommendations for a practicing statistician // Biom J. 2018. N 60 (3). С. 431–449. <https://doi.org/10.1002/bimj.201700067>

13. Лучинин А. С., Лянгузов А. В. Модель логистической регрессии для прогнозирования летальности в отделении интенсивной терапии: проблемы и решения // Качественная клиническая практика. 2022. № 2. С. 13–20. <https://doi.org/10.37489/2588-0519-2022-2-13-20>

14. Огорокова Т. О., Крючкова О. Н. Модель логистической регрессии для прогнозирования неэффективности двойной антигипертензивной терапии: проспективное сравнительное нерандомизированное клиническое исследование // Кубанский научный

медицинский вестник. 2023. № 30 (5). С. 54–63. <https://doi.org/10.25207/1608-6228-2023-30-5-54-63>

15. Гель А. Ю. Применение метода логистической регрессии на основе датасета факторов риска заболевания раком // Молодой учёный. 2023. № 16 (463). С. 6–8.

16. Schober P., Vetter T. R. Logistic Regression in Medical Research // *Anesthesia & Analgesia*. 2021. N 132 (2). P. 365–366. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000005247>

17. Jong Hae Kim. Multicollinearity and misleading statistical results // *Korean J. Anesthesiol.* 2019. N 72 (6). P. 558–569. <https://doi.org/10.4097/kja.19087>

18. Senaviratna N. A. M. R., Cooray T. M. J. A. Diagnosing Multicollinearity of Logistic Regression Model // *Asian Journal of Probability and Statistics*. 2019. N 5, is. 2. P. 1–9. <https://doi.org/10.9734/ajpas/2019/v5i230132>

19. Григорьев С. Г., Лобзин Ю. В., Скрипченко Н. В. Роль и место логистической регрессии и ROC-анализа в решении медицинских диагностических задач // *Журнал инфектологии*. 2016. Т. 8, № 4. С. 36–45.

20. Мамаев А. Н., Кудлай Д. А. Статистические методы в медицине. М.: Практическая медицина, 2021. 136 с.

References

1. Chernyaeva T.N., Nikiforova A.A., Maslova S.S., Mazur L.D. Mathematics in medicine. *Stolypinskii vestnik = Stolypinsky Bulletin*. 2022;(10):1–13. (In Russ.)

2. Kiselev K.V., Noeva E.A., Vyborny O.N., et al. Development of an algorithm for the operation of a logical solver of an intelligent medical decision support system for instrumental diagnosis of angina pectoris. *Meditinskiiye tekhnologii. Otsenka i vybor = Medical Technologies. Assessment and Selection*. 2019;(1):32–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.31556/2219-0678.2019.35.1.032-042>

3. Parondzhanov V.D. Learn to write, read and understand algorithms. Algorithms for correct thinking. Fundamentals of algorithmization. 2nd ed. Moscow: DMK Press; 2016. 520 p. (In Russ.)

4. Sobchenko K.V., Kovalenko A.V., Koshkarov A.A., et al. Development of an algorithm for automated wavelet analysis of data on the work of the registry of a clinical oncological dispensary at the regional level. *Vrach i informatsionnye tekhnologii = Doctor and Information Technologies*. 2018 Oct:66–73. (In Russ.)

5. Mikheev A.E. An approach to the implementation of medical decision support systems based on the principles of a service-oriented architecture using the services of the digital medical ecosystem. *Menedzher zdavookhraneniya = The Health Care Manager*. 2024;(S):101–118. (In Russ.) <https://doi.org/10.21045/1811-0185-2024-S-101-118>

6. Kotonskiy I.N., Malina Yu.V. Method of private algorithms of doctor's actions as a way of adapting clinical recommendations in medical practice. *Meditinskiiye tekhnologii. Otsenka i*

vybor = *Medical Technologies. Assessment and Selection*. 2022;(44):9–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.17116/medtech.2022440119>

7. Fong N. Algorithms of differential diagnosis. General complaints in adult patients. Moscow: GEOTAR-Media; 2022. 680 p. (In Russ.)

8. Korneenkov A.A., Ryazantsev S.V., Vyazemskaya E.E., Budkova M.A. Measures of informativeness of diagnostic medical technologies in otorhinolaryngology: calculation and interpretation. *Rossiiskaya otorinolaringologiya = Russian Otorhinolaryngology*. 2020;(19):46–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2020-1-46-55>

9. Gabbasov A.A. Mathematical modeling of biological processes in medicine. *Vestnik nauki = Bulletin of Science*. 2024;5(12):914–922. (In Russ.)

10. Korneenkov A.A., Fanta I.V., Vyazemskaya E.E. Assessment of the dynamics of disease symptoms by methods of survival analysis. *Rossiiskaya otorinolaringologiya = Russian Otorhinolaryngology*. 2019;(18):8–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2019-4-8-14>

11. Simonov A.N., Klyushnik T.P., Androsova L.V., Mikhailova N.M. Using cluster analysis and logistic regression to assess the risk of Alzheimer's disease in patients with amnesic mild cognitive impairment. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova = Journal of Neurology and Psychiatry named after S.S. Korsakov*. 2018;(118):40–43. (In Russ.)

12. Heinze G., Wallish K., Dunkler D. Variable selection is an overview and recommendations for a practicing statistician. *Biom J*. 2018;(60):431–449. <https://doi.org/10.1002/bimj.201700067>

13. Luchinin A.S., Lyanguzov A.V. A logistic regression model for predictivemortality in the intensive care unit: problems and solutions. *Kachestvennaya klinicheskaya praktika = Qualitative Clinical Practice*. 2022;(2):13–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.37489/2588-0519-2022-2-13-20>

14. Okorokova T.O., Kryuchkova O.N. A logistic regression model for predicting the ineffectiveness of dual antihypertensive therapy: a prospective comparative non-randomized clinical trial. *Kubanskii nauchnyi meditsinskii vestnik = Kuban Scientific Medical Bulletin*. 2023;(30):54–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.25207/1608-6228-2023-30-5-54-63>

15. Gel A.Y. Application of the logistic regression method based on a dataset of cancer risk factors. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*. 2023;(16):6–8. (In Russ.)

16. Schober P., Vetter T.R. Logistic Regression in Medical Research. *Anesthesia & Analgesia*. 2021;(132):365–366. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000005247>

17. Jong Hae Kim. Multicollinearity and misleading statistical results. *Korean J. Anesthesiol*. 2019;(72):558–569. <https://doi.org/10.4097/kja.19087>

18. Senaviratna N.A.M.R., Cooray T.M.J.A. Diagnosing Multicollinearity of Logistic Regression Model. *Asian Journal of Probability and Statistics*. 2019;(5):1–9. <https://doi.org/10.9734/ajpas/2019/v5i230132>

19. Grigoriev S.G., Lobzin Yu.V., Skripchenko N.V. The role and place of logistic regression and ROC analysis in solving medical diagnostic problems. *Zhurnal infektologii = Journal of Infectology*. 2016;8(4):36–45. (In Russ.)

20. Mamaev A.N., Kudlay D.A. Statistical methods in medicine. Moscow: Prakticheskaya meditsina; 2021. 136 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Трусов Дмитрий Валерьевич,
врач-оториноларинголог, Тамбовская
областная клиническая больница
имени В. Д. Бабенко, г. Тамбов; Пензенский
институт усовершенствования врачей –
филиал Российской медицинской академии
непрерывного профессионального
образования Министерства здравоохранения
Российской Федерации, г. Пенза,
Российская Федерация,
e-mail: trudoc747@rambler.ru,
ORCID: 0009-0000-9638-4843

Dmitry V. Trusov, Otorhinolaryngologist,
Tambov Regional Clinical Hospital named
after V. D. Babenko, Tambov; Penza Institute
of Advanced Medical Training is a branch
of the Russian Medical Academy of Continuing
Professional Education of the Ministry of Health
of the Russian Federation,
Penza, Russian Federation,
e-mail: trudoc747@rambler.ru,
ORCID 0009-0000-9638-4843

Субботина Татьяна Игоревна, доктор
медицинских наук, заведующий кафедрой
общей патологии, профессор, Тульский
государственный университет,
г. Тула, Российская Федерация,
e-mail: mbd2@rambler.ru,
ORCID: 0000-0002-3217-8191

Tatyana I. Subbotina, Doctor of Sciences
(Medical), Head of the Department of General
Pathology, Professor, Tula State University,
Tula, Russian Federation,
e-mail: mbd2@rambler.ru,
ORCID: 0000-0002-3217-8191

Починина Наталья Константиновна,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой оториноларингологии
и сурдологии-оториноларингологии,
Пензенский институт усовершенствования
врачей – филиал Российской медицинской
академии непрерывного профессионального
образования Министерства здравоохранения
Российской Федерации, г. Пенза,
Российская Федерация,
e-mail: nat-pochinina@yandex.ru,
ORCID: 0000-0002-2305-9668

Natalia K. Pochinina, Candidate of Sciences,
(Medical), Associate Professor, Head
of Department of Otorhinolaryngology and Sign
Language-Otorhinolaryngology, Penza Institute
of Advanced Medical Training is a branch
of the Russian Medical Academy of Continuing
Professional Education of the Ministry
of Health of the Russian Federation,
Penza, Russian Federation,
e-mail: nat-pochinina@yandex.ru,
ORCID: 0000-0002-2305-9668

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

1. К публикации в журнале «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2. Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

– статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;

– разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа.

– сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);

– лицензионный договор.

3. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами.

4. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

5. **Публикация бесплатная.**

6. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны – 2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

7. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (строчные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, список литературы. Авторы, название, аннотация и ключевые слова, список литературы приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается аннотация (200–250 слов), отражающая краткое содержание статьи.

8. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.

9. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный – 12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс – 5 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора – 75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы (Ω , η , β , μ , ω , ν и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций (sin, cos, tg и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – прямым шрифтом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF, JPEG, PNG) с разрешением не ниже 300 dpi и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. **Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы.**

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания **не допускаются.**

12. **Список литературы к статье обязателен** и должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы (не менее 10). Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 22-25-26, тел/факс (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Изменения и дополнения к правилам оформления статей и информацию об опубликованных номерах можно посмотреть на официальном сайте журнала: <https://swsu.ru/izvestiya/seriesivt/>.