

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

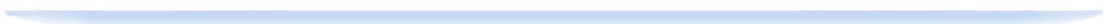
Известия

**Юго-Западного
государственного университета**

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

Научный журнал

Том 11 № 3 / 2021



Proceedings

**of the Southwest
State University**

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

Scientific Journal

Vol. 11 № 3 / 2021



**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:

Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки) – 05.11.01.

Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий (технические науки) – 05.11.13.

Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки) – 05.11.17

Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки) – 05.12.13.

Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки) – 05.13.01.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Жизняков Аркадий Львович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (г. Муром, Россия);

Жусубалиев Жаныбай Турсунбаевич, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск, Россия);

Зайченко Кирилл Владимирович, д-р техн. наук, профессор, ФГБУН «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).

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

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

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

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

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

Разинкин Константин Александрович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «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, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск, Россия);

Сизов Александр Семенович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск, Россия);

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

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

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

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

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

Чопоров Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж, 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 №ФС77-44620 от 15.04.2011).

ISSN 2223-1536 (Print)

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

© Юго-Западный государственный университет, 2021



Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:

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

Подписка и распространение:
журнал распространяется
по подписке.

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

Периодичность: четыре раза в год

Свободная цена.

Оригинал-макет подготовлен О. В. Кофановой

Подписано в печать 30.09.2021. Формат 60x84/8.

Дата выхода в свет 22.10.2021.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 22,9.

Тираж 1000 экз. Заказ 53.

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:

Devices and methods of measurement (by type of measurement) (technical Sciences) – 05.11.01.

Devices and methods of control of the natural environment, substances, materials and products (technical Sciences) – 05.11.13.

Devices, systems and medical devices (technical Sciences) – 05.11.17.

Telecommunication systems, networks and devices (technical Sciences) – 05.12.13.

System analysis, management and information processing (by industry) (technical Sciences) – 05.13.01.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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);

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

Arkady L. Zhiznyakov, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Murom Institute (branch) Vladimir State
University named after Alexander Grigoryevich
and Nikolai Grigoryevich Stoletov (Murom, Russia);

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

Igor V. Zotov, 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 №FS77-44620 of 15.04.2011).

ISSN 2223-1536 (Print)

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. V. Kofanova

© Southwest State University, 2021



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

Signed for printing 30.09.2021. Format 60x84/8.

Release date 22.10.2021.

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

Circulation 1000 copies. Order 53.

16+

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ.....	8
Оригинальные статьи	
Мобильная система мониторинга, раннего обнаружения и оценки пожарной опасности.....	8
<i>Шевцов М. В., Аксёнов В. В., Сафронов Р. И., Шульга Л. В., Дегтярев С. В.</i>	
Мобильное приложение, диагностирующее заболевание органов зрения	26
<i>Добров Э. Р.</i>	
МЕХАТРОНИКА, РОБОТОТЕХНИКА.....	34
Оригинальные статьи	
Алгоритм агрегирования квазистационарных измерительных данных сенсорных узлов	34
<i>Павлов А. М., Кудинов В. А.</i>	
РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ.....	48
Оригинальные статьи	
Метод и алгоритмы декодирования электрофизиологических сигналов в биотехнических системах реабилитационного типа	48
<i>Трифонов А. А., Филист С. А., Петрунина Е. В., Кузьмин А. А., Сафронов Р. И., Крикунова Е. В.</i>	
Метод распознавания уровня качества обслуживания пакетного трафика сетевыми маршрутами в условиях импликантного наблюдения	78
<i>Северюков А. Е., Стребков Д. А.</i>	
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ	102
Оригинальные статьи	
Структура приемного тракта модуля обработки сообщений автоматического зависимого наблюдения-вещания	102
<i>Титенко Е. А., Щитов А. Н., Локтионов А. П., Архипов А. Е., Шиянов Б. А., Яшин А. Г.</i>	
Дискуссия как педагогическая технология развития soft skills будущих IT-специалистов.....	121
<i>Томакова Р. А., Томаков М. В.</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	142
Оригинальные статьи	
Метод синтеза математических моделей оценки пожарной обстановки и состояния людей, находящихся в зоне пожара	142
<i>Корневский Н. А., Шевцов М. В., Стародубцева Л. В., Сипливый Г. В.</i>	
Методика оценивания времени подготовки возвращаемой ступени ракеты космического назначения к повторному пуску на примере ракеты-носителя FALCON 9 FT	160
<i>Стельмах С. Ф., Андронов В. Г., Коптев Д. С.</i>	
Нечеткие математические модели прогнозирования и оценки степени тяжести отравления угарным газом.....	180
<i>Шевцов М. В., Стародубцева Л. В., Сафронов Р. И., Сергеева С. С.</i>	
К сведению авторов	198

CONTENT

INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS.....	8
Original articles	
Mobile System for Monitoring, Early Detection and Assessment of Fire Danger	8
<i>Shevtsov M. V., Aksenov V. V., Safronov R. I., Shulga L. V., Degtyarev S. V.</i>	
Mobile App Diagnostic Disease of the Vision Organs	26
<i>Dobrov E. R.</i>	
MECHATRONICS, ROBOTICS.....	34
Original articles	
Algorithm for Quasi-Stationary Measurement Data Aggregation of Sensor Nodes	34
<i>Pavlov A. M., Kudinov V. A.</i>	
IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING	48
Original articles	
Method and Algorithms for Decoding Electrophysiological Signals in Biotechnical Systems of Rehabilitation Type	48
<i>Trifonov A. A., Philist S. A., Petrunina E. V., Kuzmin A. A., Safronov P. I., Krikunova E. V.</i>	
A Method for Recognizing the Level of Service Quality by Network Routes of Packet Traffic in the Conditions of Implicit Surveillance	78
<i>Sevryukov A. E., Strebkov D. A.</i>	
SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING	102
Original articles	
The Structure of the Receiving Path of the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast Message Processing Module	102
<i>Titenko E. A., Shchitov A. N., Loktionov A. P., Arhipov A. E., Shiyanov B. A., Yaschin A. G.</i>	
Discussion As a Pedagogical Technology for the Development of Soft Skills of Future IT Specialists.....	121
<i>Tomakova R. A., Tomakov M. V.</i>	
MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS.....	142
Original articles	
Method of Synthesis of Mathematical Models for Assessing the Fire Situation and the Condition of People in the Fire Zone	142
<i>Korenevsky N. A., Shevtsov M. V., Starodubtseva L. V., Siplivy G. V.</i>	
Methodology for Estimating the Preparation Time of the Return Stage of a Space Rocket for Re-Launch Using the Example of the FALCON 9 FT Launch Vehicle.....	160
<i>Stelmakh S. F., Andronov V. G., Koptev D. S.</i>	
Fuzzy Mathematical Models for Predicting and Assessing the Severity of Carbon Monoxide Poisoning	180
<i>Shevtsov M. V., Starodubtseva L. V., Safronov R. I., Sergeeva S. S.</i>	
Information for Authors	198

УДК 629.5.067.8, 699.88

Мобильная система мониторинга, раннего обнаружения и оценки пожарной опасности

М. В. Шевцов¹, В. В. Аксёнов² ✉, Р. И. Сафронов³, Л. В. Шульга², С. В. Дегтярев²

¹ Академия Государственной противопожарной службы МЧС России
ул. Галушкина 4, г. Москва 129366, Российская Федерация

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

³ Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова
ул. К. Маркса 70, г. Курск 305021, Российская Федерация

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Целью исследования является разработка рекомендаций по применению мобильных платформ мониторинга, раннего обнаружения и оценки пожарной опасности на основе использования разнородной информации о состоянии объекта и современных информационных и интеллектуальных технологий, обеспечивающих повышение качества принимаемых решений о пожарной обстановке.

Методы. Для оценки характера и типа пожаров, порождаемых пламенем, предлагается использовать датчики электромагнитных полей в сочетании с датчиками химических веществ и температуры горения. Для синтеза математических моделей оценки пожарной ситуации и прогнозирования и оценки состояния людей, находящихся в зоне пожаров, используются нейронные сети и гибридные нечеткие решающие правила.

Результаты. В ходе проведенных исследований сформулированы основные задачи, решаемые с помощью мобильных платформ, которые взаимодействуют с автоматизированными рабочими местами операторов. Выбраны типы регистрируемых сигналов в контролируемых зонах и сформированы рекомендации по выбору элементной базы мобильных платформ. Приведены рекомендации по синтезу решающих правил оценки пожарной ситуации, прогнозирования и оценки состояния людей, находящихся в зоне пожара. Приведен пример классификации тлеющего и открытого пламени.

Заключение. В ходе проведенных исследований был определен перечень задач, решаемых с помощью мобильных платформ в ходе мониторинга, раннего обнаружения и оценки пожарной опасности. Показано, что в качестве базовой системы датчиков пожарной обстановки следует использовать датчики электромагнитных полей ультрафиолетового, оптического и инфракрасного диапазона в сочетании с датчиками температуры и химического состава веществ в области возгорания. Выбор датчиков и синтез решающих правил классификации типа и характера пожаров целесообразно осуществлять с использованием современных математических методов, информационных и интеллектуальных технологий.

© Шевцов М. В., Аксёнов В. В., Сафронов Р. И., Шульга Л. В., Дегтярев С. В., 2021

Ключевые слова: пожарная обстановка; многоспектральный анализ; мобильные платформы; нейронные сети; нечеткая логика.

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

Для цитирования: Мобильная система мониторинга, раннего обнаружения и оценки пожарной опасности / М. В. Шевцов, В. В. Аксёнов, Р. И. Сафронов, Л. В. Шульга, С. В. Дегтярев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 3. С. 8–25.

Поступила в редакцию 10.07.2021

Подписана в печать 09.08.2021

Опубликована 30.09.2021

Mobile System for Monitoring, Early Detection and Assessment of Fire Danger

Maxim V. Shevtsov¹, Vitaliy V. Aksenov² ✉, Ruslan I. Safronov³,
Leonid V. Shulga², Sergey V. Degtyarev²

¹ Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia
4 Galushkina str., Moscow 129366, Russian Federation

² Southwest State University,
50 let Oktyabrya str., 94, Kursk 305040, Russian Federation

³ Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov
70 K. Marx str., Kursk 305021, Russian Federation

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop recommendations for the use of mobile platforms for monitoring, early detection and assessment of fire danger based on the use of heterogeneous information about the state of the object of study and modern information and intelligent technologies that improve the quality of decisions about the fire situation.

Research methods. To assess the nature and type of fires, it is proposed to use sensors of electromagnetic fields generated by the flame, in combination with sensors of chemicals and burning temperature. Neural networks and hybrid fuzzy decision rules are used to synthesize mathematical models for assessing the fire situation and predicting and evaluating the condition of people in the fire zone.

Results. In the course of the conducted research, a range of the main tasks solved by mobile platforms interacting with automated operator workstations was formulated. The types of registered signals in the controlled zones are selected and recommendations for the selection of the element base of mobile platforms are formed. Recommendations are given for the synthesis of decisive rules for assessing the fire situation, forecasting and assessing the condition of people in the fire zone. An example of the classification of smoldering and open flames is given.

Conclusion. In the course of the conducted research, a list of tasks solved by mobile platforms during monitoring, early detection and assessment of fire danger was determined. It is shown that as a basic system of fire situation sensors, sensors of electromagnetic fields of the ultraviolet, optical and infrared range should be used in combination with sensors of temperature and chemical composition of substances in the area of ignition. It is advisable to select the

composition of sensors and synthesize the decisive rules for classifying the type and nature of fires using modern mathematical methods, information and intelligent technologies.

Keywords: fire situation; multispectral analysis; mobile platforms; neural networks; fuzzy logic.

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

For citation: Shevtsov M. V., Aksenov V. V., Safronov R. I., Shulga L. V., Degtyarev S. V. Mobile System for monitoring, Early Detection and Assessment of Fire Danger. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2021; 11(3): 8–25. (In Russ.)

Received 10.07.2021

Accepted 09.08.2021

Published 30.09.2021

Введение

В России и за рубежом ведутся активные работы по обеспечению пожарной безопасности. Одним из важных направлений в этой области является разработка мобильных систем раннего обнаружения и своевременного оповещения о пожарах как на открытой местности, так и в закрытых помещениях [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8]. В качестве чувствительных элементов (сенсоров, датчиков) используют различные пожарные извещатели, которые обнаруживают изменение оптической плотности воздуха в результате задымления, рост температуры или темп прироста температуры, появление открытого пламени. Однако исследования показали, что достаточно часто дым выделяется в течение многих минут или даже часов до уровня, вызывающего срабатывание дымового извещателя, что значительно снижает эффективность таких приборов, так как определить точное место расположения источника возгорания не представляется возможным.

Анализируя различные типы пожарных извещателей, в работах [1; 6] обосновывается перспективность использования датчиков обнаружения монооксида углерода (CO), поскольку уровень CO (угарный газ) появляется в регистрируемых уровнях раньше CO₂. При этом угарный газ в объёме распространяется более равномерно, чем CO₂. Известно также, что 80 % смертных случаев приходится на отравление угарным газом.

Другим перспективным направлением слежения за возникновением и развитием пожаров является многозональное сканирование местности с помощью видеокамер, работающих в видимом, инфракрасном и ультрафиолетовом спектрах [2; 3; 4]. Также многозональное наблюдение позволяет «увидеть» ситуации, предшествующие появлению открытого пламени и в условиях, когда воздушные потоки могут «относить» угарный и/или другие типы газов, выделяющихся при горении, от регистрирующих датчиков.

Учитывая достоинства и недостатки систем мониторинга с газоанализаторами, оптических и многозональных систем контроля, в данной работе рассматривается вариант совмещения датчиков и камер, контролирующих разнородную информацию в зоне интереса пользователя (контроль за пожаром и экологической обстановкой в зоне пожара) с целью повышения эффективности существующих систем обнаружения пожаров как на открытой местности, так и в закрытых помещениях.

При этом многофункциональная регистрирующая аппаратура, в зависимости от целей и решаемых задач, может устанавливаться на неподвижных платформах, на летающих и подвижных наземных платформах.

Материалы и методы

Предлагаемая многофункциональная мониторинговая система ориентирована на решение нескольких основных задач:

- сбор разнородной информации об объектах наблюдения, её предварительная обработка для принятия первичных оперативных решений и передача для дальнейшей обработки;
- оценка экологической обстановки и прогноз её развития;
- оценка риска для здоровья людей, находящихся в зоне развития пожара, не относящихся к ликвидаторам пожара и других сопутствующих чрезвычайных ситуаций (ЧС);

– решение навигационных задач, связанных с определением координат пожара и подвижной платформы с датчиками, определение и управление траекторией движения по заданным условиям, определение направления и площадей распространения огня и продуктов горения и т. д.

Анализ перечисленных задач показывает, что часть из них решается известными и хорошо отработанными методами, а часть носит сложный системный характер, для решения которых требуется использование современных информационных и интеллектуальных технологий.

Конструктивно в наиболее распространенных и в предлагаемой системах датчики, видеокамеры и другая контролирующая аппаратура с блоками предварительной обработки данных размещаются на подвижных и (или) неподвижных платформах в непосредственной близости от контролируемых территорий.

Задачи более высокого порядка, включая интеллектуальные системы принятия решений и управления, решаются с использованием удаленных достаточно мощных средств вычислительной техники, часто определяемых как автоматизированные рабочие места (АРМ) операторов.

Часть задач по оценке пожарной и экологической обстановки и возможной опасности для людей, находящихся в

зоне ЧС, может решаться с использованием современных смартфонов и планшетных компьютеров при установке на них специального программного обеспечения.

Для организации съема информации с датчиков задымления и вредных веществ, выделяемых в процессе горения (CO , CO_2 , фенолы, формальдегиды), а также за контролем температуры современная промышленность выпускает специализированные микрочипы (аналоговые интерфейсы типа AFE), которые кроме регистрации информации с датчиков решают задачи усиления, масштабирования, аналоговой и цифровой фильтрации, формирования стандартных протоколов для подключения к микроконтроллерам, контроля работоспособности и калибровки датчиков и др. Микрочипы этого класса имеют малые габариты, вес и потребляемую мощность.

Такие особенности позволяют совмещать их вместе с датчиками на мало-мощных летательных аппаратах и на борту микророботов.

Специально для анализаторов химического состава, включая содержание газов окружающей среды (CO , CO_2 и др.), фирма Texas Instruments разработала микросхемы LMP901XX/LMP91XX. Решая задачи масштабирования, калибровки и формирования опорных напряжений, эти микрочипы позволяют повысить точность измерений при использовании различных типов датчиков. При этом следует иметь в виду, что аналоговые выходы этого семейства датчиков

требуют наличия микроконтроллеров, решающих задачи подготовки данных для передачи на дальнейшую обработку. Кроме того, отсутствие хороших фильтров в этом классе AFE перекладывает задачу улучшения соотношения сигнал/шум на другие технические средства.

Специально для разработки многофункциональных систем, работающих с различными типами датчиков в медицине и экологии, фирма Analog Devices разработала прецизионные и энергоэффективные чипы (meter-on-a-chip) типа ADuCM350. Основное назначение этого чипа – объединение различных устройств, следящих за состоянием здоровья и (или) окружающей среды. Множество пассивных датчиков (электроды, емкостные датчики, электрохимические датчики, тензодатчики и т. д.) подключаются к ADuCM350 через матрицу аналоговых коммутаторов. Через эту же матрицу при необходимости для обеспечения нормальной работы некоторых типов датчиков подаются напряжения, формируемые внутренним программно-управляемым генератором.

Температурный режим микросхемы контролируется температурным датчиком. Данные температурного датчика могут использоваться для оценки и коррекции погрешностей измерений. Для проведения биоимпедансных измерений используется быстрое преобразование Фурье. С целью улучшения соотношений сигнал/шум реализуются программируемые цифровые фильтры. Работа

аналого-цифровой части поддерживается контроллером AFE. Взаимодействие аналого-цифровой части AFE с другими блоками микросхемы ADuCM350 и «внешним цифровым миром» обеспечивает процессор ARM Cortex-M3 (частота работы процессора 16 мГц). Микропроцессорная часть микросхемы содержит: контроллер сенсорной клавиатуры; интерфейс USB; контроллер ЖК-дисплея с параллельным и последовательными интерфейсами; контроллер сегментного ЖК-дисплея; блок памяти. Блок памяти состоит из Flash (384 кбайт), EEPROM (16 кбайт, электрически перепрограммируемое ПЗУ), SRAM (32 кбайт, статическое ОЗУ).

С внешними цифровыми устройствами и с активными датчиками (например, AFE-акселерометрами) микросхема ADuCM350 связывается посредством периферийного интерфейса, аппаратно поддерживая последовательные интерфейсы UART, SPI, I²C, I²S, а также побитно-программно-управляемый интерфейс GPIO.

С помощью интерфейса GPIO пользователь может создавать как свои протоколы обмена, так и стандартные интерфейсы типа дополнительных SPI, I²C и т. д.

Микросхема ADuCM350 обеспечивает широкие возможности управления питанием и может работать от одноэлементной дисковой батарейки.

Расширение возможностей ADuCM350 решается её подключением к другим

AFE и к различного типа микроконтроллерам, которые совместно с АРМ операторов решают перечисленный выше задачи.

Варианты технической реализации

Состав и структура технических средств, реализующихся на платформе наблюдения за пожарами и экологичной обстановкой, определяются техническими возможностями носителя и решаемыми задачами.

Например, в работах [1; 5] приводится вариант простейшего устройства обнаружения возгораний на основе датчика CO, расположенного на борту летательного аппарата, выполненного по схеме «машущего крыла» с возможностью длительного планирования. Такая конструкция при полете к месту наблюдения не создает турбулентности, что позволяет достаточно точно контролировать анализируемый состав газов.

В работах [2; 3; 4] описан вариант подвижных и неподвижных платформ, состоящих из трех типов видеокамер, работающих в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах изображений контролируемой местности.

На рисунке 1 приведен вариант структуры малогабаритной энергоэффективной платформы для различных типов летательных аппаратов (машущее крыло, роторные конструкции, аэростат, воздушный шар и др.) и наземных микророботов.

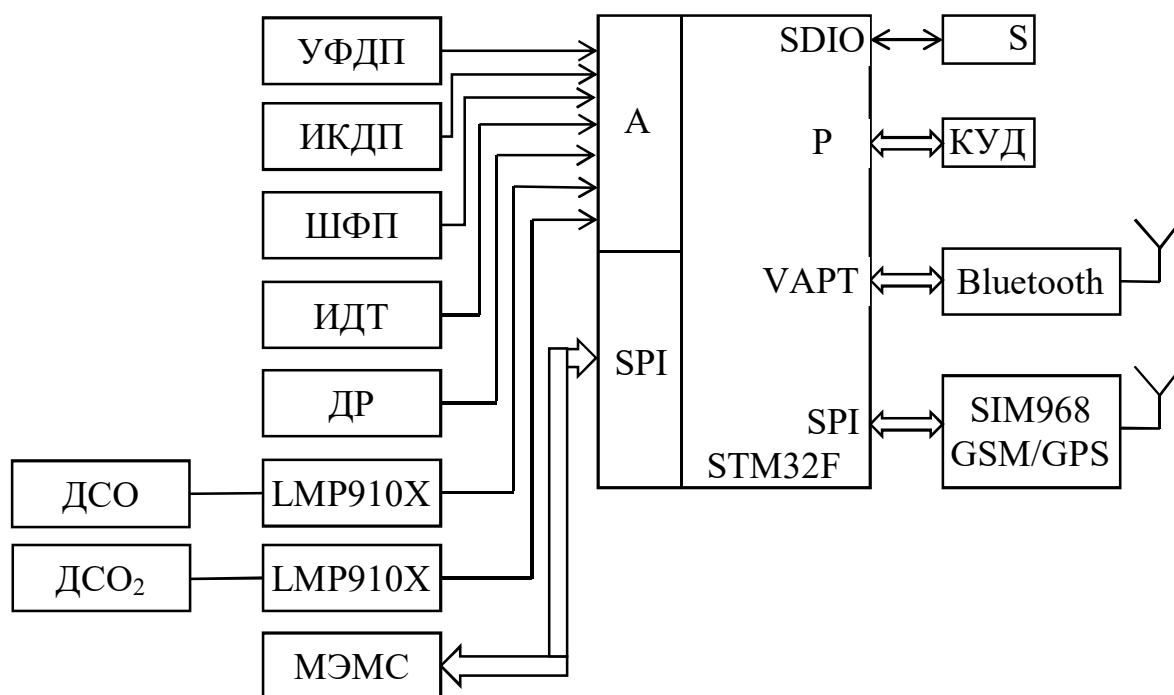


Рис. 1. Структура электронной части мобильной платформы

Fig. 1. Structure of the electronic part of the mobile platform

В этом варианте учитываются современные тенденции в обнаружении пожаров, которые основаны на использовании многоспектральных датчиков, регистрирующих ультрафиолетовое, видимое и инфракрасное излучение. Современные датчики этого типа имеют малые габариты и вес, что позволяет их использовать в составе малогабаритных платформ.

В схеме, приведенной на рисунке 1, выбраны ультрафиолетовый (УФДП), инфракрасный (ИКДП) датчики пожаров с аналоговыми выходами, которые подключены к микроконтроллеру (МК) типа STM32F через его многоканальный аналого-цифровой преобразователь (входы А). Этот тип микроконтроллера

отличается своей экономичностью и многофункциональностью.

Для фиксации излучения от возможного пожара в видимом спектре используется широкополосный фотоприемник (ШФП). Контроль температуры окружающей платформу среды осуществляется инфракрасным датчиком (ИДТ) с аналоговым выходом. Датчики газов СО и СО₂ подключаются к микроконтроллеру через АФЕ типа LMP910X.

Для обнаружения препятствий и их обхода программным путем к одному из аналоговых входов микроконтроллера подключен датчик расстояния (ДР).

Управление движением платформы осуществляется микроконтроллером через порт Р, подключенный к контроллеру управления движением (КУД). Для

запоминания параметров очага возгорания, включая концентрацию вредных веществ, к интерфейсу SDIO подключается твердотельная память SD.

Для стабилизации траектории движения и обеспечения возможности программного управления его траекторией применяют датчики движения. Для этих целей удобно использовать микромеханические системы, выполненные по технологии МЭМС, контролирующие до шести степеней свободы. Наиболее точно траектория движения поддерживается при помощи спутниковых навигационных систем. Однако в условиях ЧС спутниковая связь может быть неустойчивой. Одним из способов повышения точности траектории движения может служить использование радиометок типа RFT с заранее известными координатами, установленными на объектах повышенной опасности и в их окрестности. Радиометки могут устанавливаться на спасательной технике, имеющей более устойчивую спутниковую связь, чем платформа.

Предусмотрено управление движением в направлении максимальной величины концентрации вещества, выбранного программным путем; по траекториям с примерно одинаковой концентрацией вещества (для построения топологической картины поражения). Одновременно предусмотрен механизм облета или объезда препятствий и областей с

температурой, способной вывести из строя бортовое оборудование.

Для планирования и выбора траектории разработан алгоритм управления, основанный на симплекс-методе и методе Кифера.

Движение в пространстве к точке с максимальной концентрацией вещества начинается с двумерного симплекса, а по мере приближения к локальной точке поиск производится на основе планирования отрезков прямой с фиксацией одной из координат (метод Кифера).

Ближняя радиосвязь обеспечивается радиомодулем Bluetooth, дальняя спутниковая связь – радиомодулем SIM968.

Если платформа располагается на летательных аппаратах роторного типа, возникает проблема турбулентности, мешающая распространению газов в зоне наблюдения. В результате газовые датчики (CO, CO₂ и др.) будут регистрировать неверную информацию. Одним из способов уменьшения погрешности этого типа является размещение газовых датчиков на дополнительной платформе, спускаемой к месту контроля, где турбулентность от винтов перестает влиять на процесс измерения. Энерговооруженность современных мультироторных платформ вполне способна нести на своем борту дополнительное оборудование в виде управляемой микролебедки.

Для повышения качества обработки данных, снимаемых с разнородных датчиков, с последующим принятием решений целесообразно ставить multifunctional AFE, решающий задачи подавления помех, калибровки, контроля работоспособности датчиков и подготовки данных для передачи в МК.

При наличии технической возможности на платформе желательно разместить видеокамеру, работающую в видимом спектре электромагнитных излучений. При этом обнаружение пожара и движение в направлении его распростра-

нения целесообразно осуществлять с помощью датчиков, наиболее чувствительных к типу возгорания, а включение и необходимую ориентацию видеокамеры осуществлять на расстоянии, оптимальном для передачи «картинки» пожара на автоматизированные рабочие места операторов.

На рисунке 2 приведена структура платформы с multifunctional AFE (MAFE) типа ADuMC350. С целью упрощения на ней не показана система навигации и управления движения платформы.

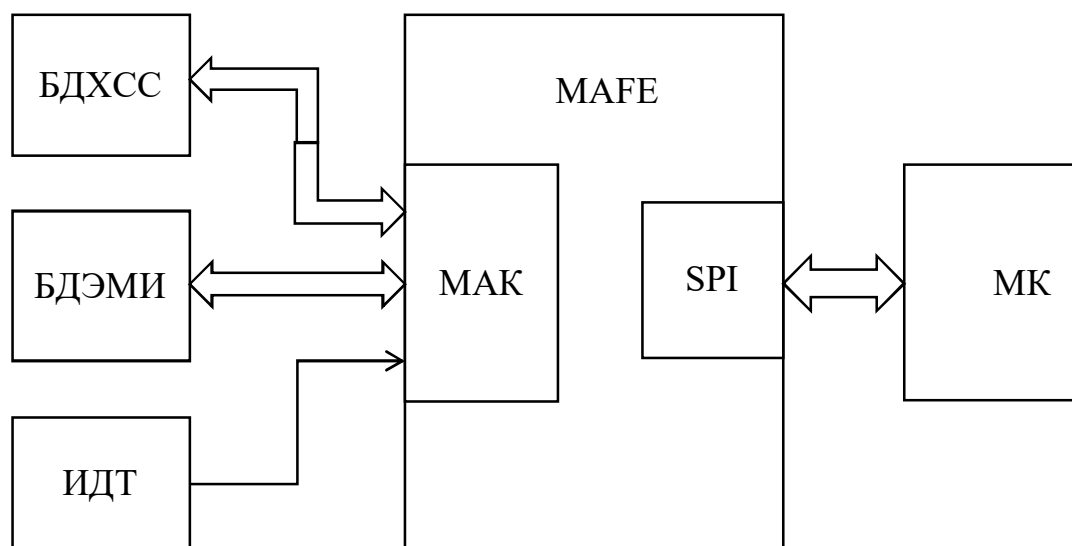


Рис. 2. Структурная схема платформы с multifunctional AFE

Fig. 2. Block diagram of the platform with multifunctional AFE

В схеме, приведенной на рисунке 2, блок датчиков химического состава среды (БДХСС), блок датчиков электромагнитного излучения (БДЭМИ) (ультрафиолетовый, видимый и инфракрасный спектр) и инфракрасный датчик температуры (ИДТ) подключаются к

MAFE через multifunctional аналоговый коммутатор (МАК). Коммутатор этого типа подключает выходы датчиков ко входному инструментальному усилителю AFE и далее – к схемам фильтрации и преобразования, включая формирование информации о состоянии

окружающей среды в виде стандартного протокола типа SPI. При необходимости этот же коммутатор подает на элементы датчиков питающие и эталонные напряжения и организует режим их калибровки и проверки качества и правильности их подключения к схеме. К микроконтроллеру MAFE обычно подключается через интерфейс типа SPI, хотя нет ограничений на соединение и по другим портам, имеющимся в составе ADuMC350.

Результаты и их обсуждение

Анализ спектрального состава пламени от различных источников показывает, что оно может содержать ультрафиолетовый участок (0,1...0,4 мкм), участок видимого света (0,4...0,75 мкм), ближний инфракрасный (0,75...1,5 мкм), средний инфракрасный (1,5...5,6 мкм), дальний инфракрасный (5,6...100 мкм).

С учетом того, что каждый очаг горения имеет свою индивидуальную спектральную характеристику, многоспектральный (многодиапазонный) анализ пламени потенциально может быть использован для распознавания типов и характера пламени. При этом следует иметь в виду, что основная мощность электромагнитного излучения сосредоточена в ИК-диапазоне и в этом же диапазоне сосредоточена основная доля помех, например от солнца. С другой стороны, проводимые эксперименты показывают, что совместный анализ источника пламени в различных частотных

диапазонах позволяет «отстроиться» от подавляющего большинства помех.

Значительную долю информации о возникновении и развитии пожаров несет изменение химического состава воздушной среды, вызванное воздействием пожара. Исследования показывают, что раньше всего (задолго до возникновения открытого пламени) в зоне возникновения пожара возникает угарный газ (CO). Это основной компонент для определения тлеющих очагов возгораний. Углекислый газ (CO₂) начинает активно выделяться в начале перехода к открытому пламени. Целый класс пожаров выделяет летучие ароматические углеводороды и т. д.

Высокой информативностью по отношению к обнаружению пожаров обладают также температура и специфические задымления.

Таким образом, существуют комбинации значений различных параметров ЭМП, химических веществ в сочетании с температурой, которые в той или иной степени характеризуют стадии и тип возгорания.

Все эти параметры оцениваются в количественных шкалах, которые могут быть использованы в задачах классификации как информативные признаки пожарной обстановки и в задачах прогнозирования и оценки состояния людей, находящихся в зоне действия пожара.

Приведенный разведочный анализ в сопоставлении с общепринятой классификацией пожаров показал, что границы между исследуемыми классами носят

нечеткий характер и требуют своего уточнения для формирования более адекватных и «тонких» управленческих решений.

С учетом сложности исследуемой структуры данных в качестве базового математического аппарата целесообразно использовать четкие или нечеткие нейронные сети или аппарат нечеткой логики, в частности, методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил [9; 10; 11; 12; 13].

При таком подходе для синтеза классификационных решающих правил моделируется искомая пожарная обстановка, по которой осуществляется обучение по критериям минимума ошибки классификации с одновременной минимизацией пространства информативных признаков, определяющих качество и количество используемых датчиков.

Хорошие результаты достигаются в том случае, если в ходе обучения формируется база данных эталонных пожаров, и классификация осуществляется по совпадению реальной обстановки с эталоном. Особенно эффективной эта схема классификации является при использовании видеоизображений пожаров с использованием камер высокого разрешения.

В качестве примера решалась задача классификации тлеющего источника (горящая вата) и скрытого от датчика экраном открытого огня от березовых дров.

В ходе обучения было показано, что исследование датчиков CO, CO₂ и тем-

пературы для расстояния 15 метров с использованием гибридной нечеткой модели обеспечивает ошибку классификации в 4%.

Процесс синтеза гибридных нечетких решающих правил для прогнозирования и оценки состояния здоровья при воздействии вредных химических веществ (включая продукты горения) описан в работах [14; 15; 16].

Для оценки эффективности предлагаемого класса многофункциональных пожарных платформ (МПП) была организована экспертная оценка ближайших аналогов, взаимодействующих с диспетчерскими пунктами, оборудованными автоматизированными рабочими местами. В качестве аналогов рассматривался летающий робот с машущим крылом (ЛРМК) [5], система обработки и анализа спектрозональных изображений СОАСЗИ [4], летающая платформа с двухзональным распознавателем пожаров ЛПДРП [6].

Для сравнения этих вариантов технических решений группа высококвалифицированных экспертов в области пожарной безопасности в составе 7 человек с коэффициентом конкордации на уровне 0,83 составила согласованный по методу Делфи список сравнительных показаний качества, каждый из которых для сравниваемых систем оценивался по 10-балльной шкале.

Усредненные экспертные оценки (средний балл) по анализируемым техническим решениям приведены в таблице.

Таблица. Экспертные оценки вариантов пожарных платформ по выбранным показателям качества**Table.** Expert assessments of fire platform variants according to the selected quality indicators

№ п/п	Показатель качества	Пожарная платформа			
		ЛРМК	СОАСЗИ	ЛПДРП	МПП
X1	Количество показателей, характеризующих пожарную обстановку (электромагнитные поля, химический состав, температура)	1	6	3	9
X2	Возможность установки на различных типах платформ	5	7	7	8
X3	Решение задач классификации пожаров по общепринятым стандартам	6	9	7	9
X4	Возможность обучения на классификацию нестандартных пожарных ситуаций	2	8	6	9
X5	Прогноз развития пожарной ситуации	3	7	6	8
X6	Возможность работы в труднодоступных местах	9	8	5	8
X7	Прогноз и оценка состояния здоровья в зоне пожара	3	0	0	8
X8	Вероятность ложного обнаружения пожара	5	7	5	8
X9	Вероятность правильного обнаружения пожара	6	7	5	8
X10	Соотношение цена/качество	6	7	5	8

На рисунке 3 приведена диаграмма сопоставления показателей качества (циклограмма) для анализируемых платформ в баллах.

Анализ рисунка 3 свидетельствует о том, что по значительному числу показателей предлагаемый вариант платформы превосходит анализируемые аналоги.

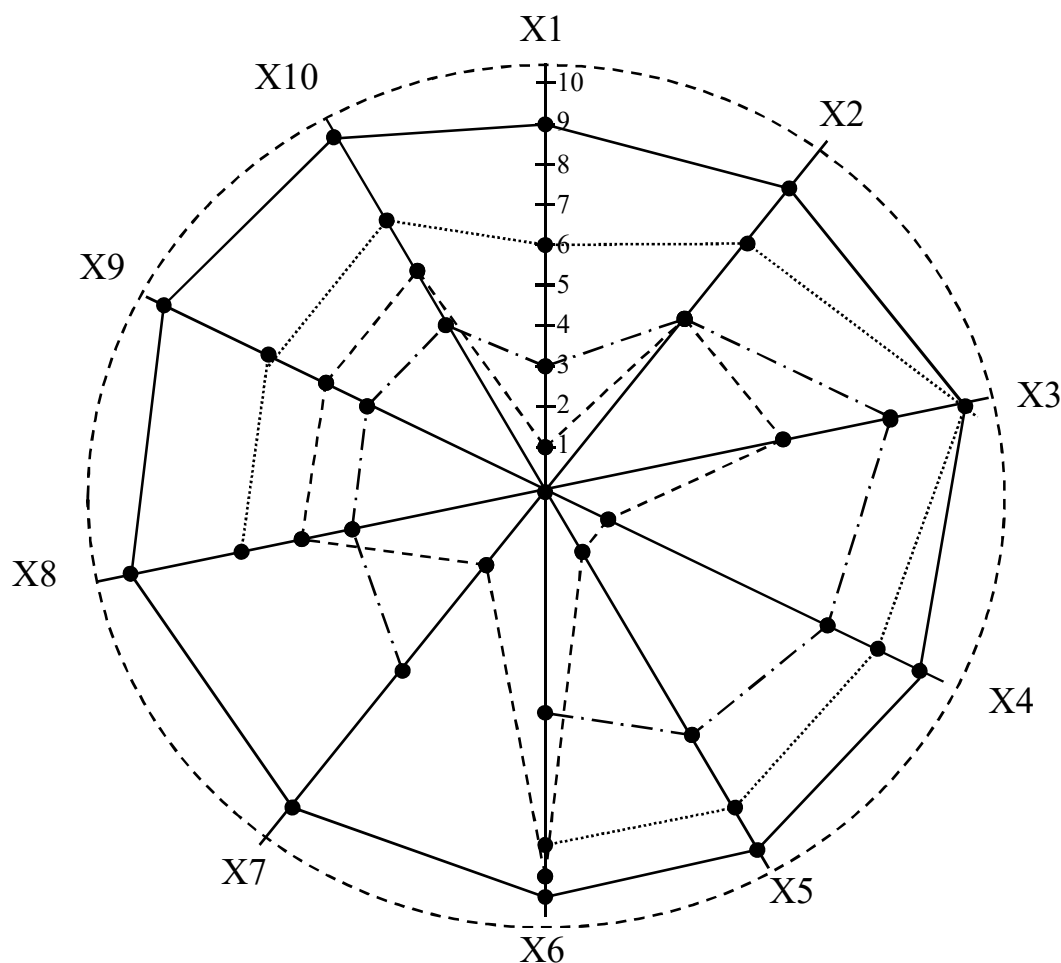


Рис. 3. Циклограмма показателей качества исследуемых платформ: ● — — — — ● ЛРМК; ● ● СОАСЗИ; ● - · - · - · ЛПДЛП; ● — — — — ● МПП

Fig. 3. Cyclogram of quality indicators of the studied platforms: ● — — — — ● FRFW; ● ● SPASI; ● - · - · - · FPTFR; ● — — — — ● MPP

В качестве интегрального показателя качества сравниваемых платформ использовался аддитивный критерий вида

$$Y_j = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \frac{B_{ij}}{B_{\max}}$$

где B_{ij} – средняя балльная оценка i -го показателя качества для j -й платформы; $j = 1, 2, 3, 4$.

В ходе расчета получены следующие усредненные значения показателей качества: $Y_{\text{ЛРМК}} = 0,45$; $Y_{\text{СОАСЗИ}} = 0,66$; $Y_{\text{ЛПДЛП}} = 0,49$; $Y_{\text{МПП}} = 0,84$.

Таким образом, предложенный вариант пожарной платформы по отобранным экспертами показателям качества превосходит все анализируемые аналоги, включая показатель цена-качество.

Выводы

В ходе проведенных исследований был установлен перечень задач, решаемых с помощью мобильных платформ в ходе мониторинга, раннего обнаружения и оценки пожарной опасности. Показано, что в качестве базовой системы датчиков пожарной обстановки следует применять датчики электромагнитных полей ультрафиолетового, оптического

и инфракрасного диапазона в сочетании с датчиками температуры и химического состава веществ в области возгорания. Выбор состава датчиков и синтез решающих правил классификации типа и характера пожаров целесообразно осуществлять с использованием современных математических методов, информационных и интеллектуальных технологий.

Список литературы

1. Поляков Р. Ю., Ефимов С. В., Яцун С. Ф. Метод раннего обнаружения пожара с помощью мобильных газовых пожарных извещателей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. № 1 (70). С. 81–89.
2. Емельянов С. Г., Труфанов М. И., Титов Д. В. Быстродействующая система технического зрения для поиска и определения характеристик очага возгорания // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2012. № 2. С. 40–43.
3. Емельянов С. Г., Труфанов М. И., Титов Д. В., Устройство распознавания возгорания на основе двувальтернативных классификаторов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 1–1 (40). С. 10–13.
4. Титов Д. В. Разработка и исследование методов, алгоритмов и технических средств обработки спектрозональных изображений: дис. ... д-ра техн. наук. Курск, 2018. 325 с.
5. Автоматизированная система контроля окружающей среды и оценки состояния людей в условиях чрезвычайных ситуаций с использованием летающего робота / С. Ф. Яцун, Н. А. Корневский, С. В. Ефимов, Е. Н. Коровин // Медицинская техника. 2018. № 4. С. 52–54.
6. Пат. 235931 Российская Федерация. Способ мониторинга пожарной обстановки / Резников В. М., Онищенко Ю. А., Щеголькова В. В. № 2008129952/12; заявл. 21.07.08; опубл. 27.07.10, Бюл. № 21.
7. Минин И. В., Логачев В. Г. Методика обнаружения возгорания с использованием Цифровой обработки изображения // Фундаментальные исследования. 2016. № 6-2. С. 299–307.
8. Денисов М. С., Кожевин А. С., Чалый В. С. Распознавание источников открытого огня на ранних стадиях пожара с помощью видеодетектора // Современные

технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2014. № 1 (5). С. 93–94.

9. Корневский Н. А. Метод синтеза гетерогенных нечетких правил для анализа и управления состоянием биотехнических систем // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 2. С. 99–103.

10. Корневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1. С. 33–35.

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

12. Корневский Н. А., Разумова К. В. Синтез коллективов гибридных нечетких моделей оценки состояния сложных систем // Научные технологии. 2014. Т. 15, № 12. С. 31–39.

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

14. Использование технологии мягких вычислений для прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний работников агропромышленного комплекса: монография / Н. А. Корневский, В. И. Серебровский, Р. В. Степашов, Т. Н. Говорухина. Курск. Изд-во Курской государственной сельскохозяйственной академии имени И. И. Иванова, 2016. 224 с.

15. Григоров И. Ю. Методы и средства прогнозирования и ранней диагностики профессиональных заболеваний работников гальванических производств на основе нечетких моделей принятия решений: дис. ... д-ра техн. наук. Курск, 2020. 147 с.

16. Математические модели прогнозирования и ранней диагностики бронхиальной астмы у работников, контактирующих с промышленными ядохимикатами / С. Н. Родионова, В. В. Аксенов, Д. А. Медников, Р. И. Сафронов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. № 1. С. 130–144.

References

1. Polyakov R. Yu., Efimov S. V., Yacun S. F. Metod rannego obnaruzheniya pozhara s pomoshch'yu mobil'nyh gazovyh pozharnyh izveshchatelej [Method for early fire detection with a mobile gas fire detectors]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2017, no. 1 (70), pp. 81–89.

2. Titov D. V., Emel'yanov S. G., Trufanov M. I. Bystrodejstvuyushchaya sistema tekhnicheskogo zreniya dlya poiska i opredeleniya harakteristik ochaga vozgoraniya [High-speed vision system to locate and determine the characteristics of fire]. *Izvestiya VUZov. Priborostroenie = Proceedings VUZov. Instrumentation*, 2012, no. 2, pp. 40-43.

3. Emel'yanov S. G., Trufanov M. I., Titov D. V. Ustrojstvo raspoznavaniya vozgoraniya na osnove dvual'ternativnyh klassifikatorov [The Recognizer fire-based classifiers dalternative]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 1–1 (40), pp. 10-13.

4. Titov D. V. Razrabotka i issledovanie metodov, algoritmov i tekhnicheskikh sredstv obrabotki spektrozonal'nyh izobrazhenij. Diss. dokt. tekhn. nauk [Development and research of methods, algorithms, and hardware processing multispectral images. Dr. techn. sci. diss.]. Kursk, 2018. 325 p.

5. Yacun S. F., Korenevskij N. A., Efimov S. V., Korovin E. N. Avtomatizirovannaya sistema kontrolya okruzhayushchej sredy i ocenki sostoyaniya lyudej v usloviyah chrezvy-chajnyh situacij s ispol'zovaniem letayushchego robota [Automated system for monitoring the environment and assessing the condition of people in emergency situations using a flying robot]. *Medicinskaya tekhnika = Biomedical Engineering*, 2018, no. 4, pp. 52-54.

6. Reznikov V. M., Onishchenko Yu. A., Shchegolkova V. V. Spособ monitoringa pozharnoi obstanovki [A method for monitoring the fire situation]. Patent RF, no. 2359319, 2010.

7. Minin I. V., Logachev V. G. Metodika obnaruzheniya vozgoraniya s ispol'zovaniem Cifrovoj obrabotki izobrazheniya [Method of fire detection using digital image processing] *Fundamentalnye issledovaniya = Fundamental Research*, 2016, no. 6-2, pp. 299-307.

8. Denisov M. S., Kozhevin A. S., Chalyj V. S. Raspoznavanie istochnikov otkrytogo ognya na rannih stadiyah pozhara s pomoshch'yu videodetektora [Recognition of open fire sources in the early stages of a fire using a video detector]. *Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoj oborony i likvidacii posledstvij chrezvyhajnyh situacij = Modern Technologies for Ensuring Civil Defense and Eliminating the Consequences of Emergency Situations*, 2014, no. 1 (5), pp. 93-94.

9. Korenevskij N. A. Metod sinteza geterogennyh nechetkih pravil dlya analiza i upravleniya sostoyaniem biotekhnicheskikh system [Method of synthesis of heterogeneous fuzzy rules for the analysis and control of the state of biotechnical systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation*, 2013, no. 2, pp. 99-103.

10. Korenevskij N. A. Ispol'zovanie nechetkoj logiki prinyatiya reshenij dlya medicinskih ekspertnyh system [The use of fuzzy logic of decision-making for medical expert systems] *Medicinskaya tekhnika = Biomedical Engineering*, 2015, no. 1, pp. 33-35.

11. Korenevskij N. A., Shutkin A. N., Gorbatenko S. A., Serebrovskij V. I. Ocenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya obuchayushchihsya na osnove gibridnyh intellektual'nyh tekhnologij [Assessment and management of students' health status based on hybrid intelligent technologies]. *Staryj Oskol, TNT Publ.*, 2016. 472 p.

12. Korenevskij N. A., Razumova K. V. Sintez kollektivov gibridnyh nechetkih modelej ocenki sostoyaniya slozhnyh system [Synthesis of teams of hybrid fuzzy models for assessing the state of complex systems]. *Naukoemkie tekhnologii = High-tech Technologies*, 2014, vol. 15, no. 12, pp. 31–39.

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

14. Korenevskij N. A., Serebrovskij V. I., Stepashov R. V., Govoruhina T. N. Ispol'zovanie tekhnologii myagkih vychislenij dlya prognozirovaniya i diagnostiki professional'nyh zabolevanij rabotnikov agropromyshlennogo kompleksa [The use of soft computing technology for predicting and diagnosing occupational diseases of agricultural workers]. *Kursk, Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov Publ.*, 2016. 224 p.

15. Grigorov I. Yu. Metody i sredstva prognozirovaniya i rannej diagnostiki professional'nyh zabolevanij rabotnikov gal'vanicheskikh proizvodstv na osnove nechetkih modelej prinyatiya reshenij. Diss. dokt. tekhn. nauk [Methods and means of forecasting and early diagnosis of occupational diseases of electroplating production workers based on fuzzy decision-making models. Dr. techn. sci. diss.]. *Kursk*, 2020. 147 p.

16. Rodionova S. N., Aksenov V. V., Mednikov D. A., Safronov R. I. Matematicheskie modeli prognozirovaniya i rannej diagnostiki bronhial'noj astmy u rabotnikov, kontaktiruyushchih s promyshlennymi yadodhimikatami [Mathematical models of forecasting and early diagnosis of bronchial asthma in workers in contact with industrial pesticides]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation*, 2021, no. 1, pp. 130-144.

Информация об авторах / Information about the Authors

Шевцов Максим Викторович, начальник
отделения организации практик, Академия
Государственной противопожарной службы
МЧС России, г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: shevtsovmv@mail.ru

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

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

Шульга Леонид Васильевич, доктор медицин-
ских наук, профессор, Юго-Западный государ-
ственный университет, г. Курск,
Российская Федерация

Дегтярев Сергей Викторович, доктор
технических наук, профессор, Юго-Западный
государственный университет, г. Курск,
Российская Федерация,
e-mail: sergeyd12@gmail.com

Maxim V. Shevtsov, Head of the Department
of the Organization of Practices, Academy
of State Fire Service of EMERCOM of Russia,
Moscow, Russian Federation,
e-mail: shevtsovmv@mail.ru

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

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

Leonid V. Shulga, Dr. of Sci. (Medical),
Professor, Southwest State University, Kursk,
Russian Federation

Sergey V. Degtyarev, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: sergeyd12@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.85

**Мобильное приложение,
диагностирующее заболевание органов зрения****Э. Р. Добров¹** ✉

¹ Новосибирский государственный университет экономики и управления «НИНХ»
ул. Каменская 52/1, г. Новосибирск 630099, Российская Федерация

✉ e-mail: sib.2020@bk.ru

Резюме

Цель исследования – обоснование выбора разработки мобильного решения для технологий телемедицины в офтальмологии, создание мобильного приложения для распознавания фотоснимков изображений глаза пациентов для диагностирования заболевания сетчатки органов зрения. Приложение необходимо для использования со специальным имеющимся в поликлиниках оборудованием фундус-камерой.

Методы. Для платформы мобильных устройств под управлением операционной системы Android – реализация приложения, содержащего алгоритм машинного обучения, диагностирующий наличие патологии болезней глаза.

Результаты. Описаны итоги создания мобильного приложения для телемедицины в офтальмологии, выполняющего сбор, анализ и обработку цифровой информации заболевания глаз для диагностирования и постановки диагноза врачом-офтальмологом; способа взаимодействия устройств и технологии клиент-серверной архитектуры модели. Представлен жизненный цикл разработки пилотной версии программного продукта, обозначены будущие перспективы развития. В данной работе предложена концепция мобильной информационной системы телеофтальмологии для распознавания изображений на основе глубокого обучения. На базе выдвигаемой концепции спроектировано, реализовано и протестировано мобильное решение, которое повышает качество медицинского сервиса.

Применение мобильного приложения для первичного осмотра врачом-окулистом пациентов и постановки диагноза нарушения зрительной системы позволяет повысить производительность и эффективность труда, снизить экономические затраты на предоставление услуг населению. Врач будет максимально оперативно получать доступ к необходимой информации для принятия решения о лечении пациента, тратить меньше времени на заполнение амбулаторных карт и историй болезни, уделяя больше времени непосредственно работе с пациентом.

Заключение. В результате будет сводиться к минимуму вероятность врачебных ошибок. Как следствие, улучшится качество оказания медицинских услуг для населения.

Ключевые слова: телемедицина; телеофтальмология; мобильное здравоохранение; мобильное приложение.

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

© Добров Э. Р., 2021

Для цитирования: Добров Э. Р. Мобильное приложение, диагностирующее заболевание органов зрения // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 3. С. 26–33.

Поступила в редакцию 05.07.2021

Подписана в печать 03.08.2021

Опубликована 30.09.2021

Mobile App Diagnostic Disease of the Vision Organs

Eldar R. Dobrov¹ ✉

¹ Novosibirsk State University of Economics and Management
52/1 Kamenskaya str., Novosibirsk 630099, Russian Federation

✉ e-mail: sib.2020@bk.ru

Abstract

The purpose of research is to substantiate the choice of developing a mobile solution for telemedicine technologies in ophthalmology. Creation of a mobile application for the recognition of photographs of images of the eyes of patients for diagnosing diseases of the retina of the organs of vision. The application is required for use with special equipment available in polyclinics fundus camera.

Methods. For a platform of mobile devices running the Android operating system, an application implementation containing a machine learning algorithm that diagnoses the presence of pathology of eye diseases.

Results. The article describes the results of the creation of a mobile application for telemedicine in ophthalmology, which collects, analyzes and processes digital information of eye diseases for diagnosis and diagnosis by an ophthalmologist. Description of the way devices interact and the technology of the client-server architecture of the model. The life cycle of the development of a pilot version of a software product is presented, future development prospects are indicated. This paper proposes the concept of a mobile tele-ophthalmology information system for deep learning-based image recognition. On the basis of the proposed concept, a mobile solution has been designed, implemented and tested, which improves the quality of medical service.

The use of a mobile application for the primary examination by an ophthalmologist of patients and the diagnosis of visual impairment can increase productivity and efficiency of work, reduce the economic costs of providing services to the population. The doctor will get access to the necessary information as quickly as possible to make a decision on the patient's treatment, spend less time filling out outpatient cards and medical records, spending more time directly working with the patient.

Conclusion. As a result, the likelihood of medical errors will be minimized. As a result, the quality of medical services for the population will improve.

Keywords: telemedicine; teleophthalmology; mobile healthcare; mobile application.

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

For citation: Dobrov E. R. Mobile App Diagnostic Disease of the Vision Organs. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2021; 11(3): 26–33. (In Russ.)

Received 05.07.2021

Accepted 03.08.2021

Published 30.09.2021

Введение

В результате проведенного обзора литературы было установлено, что для результативной борьбы с заболеваниями необходимо предотвращение патологии при проявлении симптомов на начальной стадии. Для лечения принимаются меры по профилактике и ранней диагностике лиц детской возрастной группы, подверженных неблагоприятному воздействию на глаза при учебной нагрузке [1; 2; 3].

Удаленный мониторинг с применением мобильных средств связи за состоянием здоровья пациента позволит врачу принимать эффективные и своевременные решения по лечению больных благодаря беспроводному сбору, обработке и передаче цифровой информации [4; 5; 6].

Мобильное здравоохранение (англ. mobile health) – отрасль телемедицинских технологий, в рамках которых развиваются мобильные решения по всему миру [6; 7; 8; 9].

На сегодняшний день развитие рынка медицинских мобильных приложений направлено на интеграцию с серверами для сбора, хранения и обработки информации медицинскими учреждениями.

На сегодняшний день классическим решением является приложение, реализованное по принципу клиент-серверной архитектуры. Сервер выполняет следующие основные команды пользователей:

организация авторизации, обработка запросов, работа с базой данных, отправка данных [10; 11; 12].

В завершении представлена концепция телеофтальмологического приложения для сбора, хранения, обработки и передачи медицинских данных для постановки диагноза врачом-окулистом [13; 14; 15].

Материалы и методы

Стандартный проект мобильного программного продукта состоит из двух следующих частей:

1) мобильный клиент для взаимодействия пациента с врачом;

2) внутренняя бизнес-логика веб-приложения на сервере для сбора, хранения, обработки и передачи медицинских цифровых данных.

Мобильная клиентская часть решения использует фундус-камеру для создания снимка изображения глаза и выполняет отправку цифровых данных на сервер для обработки. Приложение поддерживает функцию обмена сообщениями с лечащим врачом посредством электронной почты.

На сервере веб-сервиса, с которым соединено мобильное приложение, выполняются следующие функции:

1) модуль регистрации и авторизации пользователя;

2) модуль сбора, хранения, обработки и передачи информации для удаленного мониторинга окулистом пациента.

С использованием среды разработки программного обеспечения Android Studio спроектировано, написано и протестировано приложение под мобильную платформу для диагностирования глазного заболевания. Приложение поддерживает устройства, функционирующие под управлением операционной системы Android 7.0.

После установки и запуска приложения необходимо авторизоваться или зарегистрировать учетную запись пользователя. Для работы с приложением необходимо наличие интернет-подключения. В настройках мобильного приложения есть возможность сохранить результаты в базе данных, экспортировать данные и отправить по электронной почте.

Информация, полученная мобильным устройством, отправляется на сервер. Затем обработанные данные пересылаются закреплённому доктору по электронной почте (email). Программный комплекс осуществляет сбор информации в базу данных, которая синхронизируется с сервером, к которому имеет доступ медицинский персонал диагностического отделения офтальмологической клиники.

Собранные на сервере медицинские изображения глаза будут обезличены и включены в тренировочные наборы данных для тестирования точности распознавания диагноза математической моделью нейронной сети.

Методы машинного обучения в применении к задачам компьютерного зрения показывают высокие результаты. Лучшие достижения проведенных исследований по обработке публичных цифровых медицинских наборов данных в 2015 г., 2019 г. на платформе Kaggle базируются на свёрточных нейронных сетях. Успешное решение определения диагноза на основании осмотра глазного яблока достигло 93%.

Полученная математическая модель искусственной нейронной сети для распознавания изображений основана на анализе современных достижений в области машинного обучения в обработке изображений. Глубокое обучение требует большой вычислительной мощности. В разработке сложных мобильных приложений существует ряд ограничений, связанных с энергопотреблением и мощностью обработки. Для разрешения этих ограничений предложена легковесная архитектура нейронной сети для достижения компромисса между сложностью математической модели и точностью.

Результаты и их обсуждение

В будущем разработанное мобильное приложение планируется внедрить в офтальмологическом отделении лечебного учреждения.

По итогам работы будет подана заявка на получение свидетельства о государственной регистрации программы ЭВМ.

Выводы

Создан программный комплекс для мобильных средств связи для определения наличия симптомов глазных болезней у пациентов офтальмологических клиник.

Благодаря внедрению в практику глазного врача точного метода с использованием дружественного интерфейса технологии телеофтальмологии для диагностирования органов зрения снижается недоступность медицины широким слоям населения в удаленных районах страны.

Список литературы

1. Применение систем с искусственным интеллектом в диагностике офтальмологических заболеваний (обзор литературы) / А. Е. Апрелева, Р. И. Манкибаева, Б. С. Манкибаев, Е. В. Апрелева // Вестник Башкирского государственного медицинского университета. 2019. № 3. С. 10–14.
2. Астахов Ю. С., Тургель В. А. Телемедицина в офтальмологии. Часть 1. «Общая телеофтальмология» // Офтальмологические ведомости. 2020. Т. 13, № 1. С. 43–52. <https://doi.org/10.17816/OV19112>.
3. Методы машинного обучения в офтальмологии. Обзор литературы / Д. Д. Гарри, С. В. Саакян, И. П. Хорошилова-Маслова, А. Ю. Цыганков, О. И. Никитин, Г. Ю. Тарасов // Офтальмология. 2020. Т. 17, № 1. С. 20–31. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2020-1-20-31>.
4. Гусев А. В. Перспективы нейронных сетей и глубокого машинного обучения в создании решений для здравоохранения // Врач и информационные технологии. 2017. № 3. С. 92–105.
5. Современный передовой уровень искусственного интеллекта для умной медицины / О. Ю. Колесниченко, А. В. Мартынов, В. В. Пулит, Ю. Ю. Колесниченко, В. В. Шакиров, О. О. Варламов, Л. О. Минушкина, А. Ю. Сотник, Т. Н. Жилина, В. П. Дорофеев, Г. Н. Смородин, М. К. Жапаров, Л. С. Мазелис // Ремедиум. Журнал о рынке лекарств и медицинской технике. 2019. № 4. С. 36–43. <https://doi.org/10.21518/1561-5936-2019-04-36-43>.
6. Терещенко А. В., Трифаненкова И. Г., Юдина Ю. А. Телемедицина в скрининге, диагностике и лечении активной ретинопатии недоношенных // Офтальмохирургия. 2017. № 2. С. 73–77. <https://doi.org/10.25276/0235-4160-2017-2-73-77>.
7. Фокин С. Ю., Киричек Р. В. Обзор медицинских приложений, устройств и технологий связи интернета вещей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4, № 4. С. 67–80.
8. Lokman Balyen, Tunde Peto Promising Artificial Intelligence–Machine Learning–Deep Learning Algorithms in Ophthalmology // Asia-Pacific Academy of Ophthalmology. 2019. Vol. 8, N 3. P. 264–272. <https://doi.org/10.22608/APO.2018479>.

9. Mohita Sharma, Neha Jain, Sridhar Ranganathan, Naman Sharma, Santosh G. Honavar, Namrata Sharma, Mahipal S Sachdev Tele-ophthalmology: Need of the hour // Indian Journal of Ophthalmology. 2020. Vol. 68, N 7. P. 1328–1338. https://doi.org/10.4103/ijo.IJO_1784_20.
10. Sourya Sengupta, Amitojdeep Singh, Henry A. Leopold, Vasudevan Lakshminarayanan. Ophthalmic Diagnosis and Deep Learning – A Survey. URL: <http://www.arxiv.org>pdf/1812.07101v2.pdf> (дата обращения: 10.05.2021).
11. Julia E. Reid, Eric Eaton. Artificial Intelligence for Pediatric Ophthalmology. URL: <http://www.arxiv.org>pdf/1904.08796.pdf> (дата обращения: 10.05.2021).
12. Lokeshwari Aruljyothi, Anuja Janakiraman, Malligarjun B., Balasundaram Manohar Babu. Smartphone applications in ophthalmology: A quantitative analysis // Indian Journal of Ophthalmology. 2021. Vol. 69, N 3. P. 548–553. https://doi.org/10.4103/ijo.IJO_1480_20.
13. Muhammad Imran Razzak, Saeeda Naz, Ahmad Zaib. Deep Learning for Medical Image Processing: Overview, Challenges and Future. URL: [http://www.arxiv.org\"ab/1704/06825](http://www.arxiv.org\) (дата обращения: 10.05.2021).
14. Wei Lu, Yan Tong, Yue Yu, Yiqiao Xing, Changzheng Chen, Yin Shen Applications of Artificial Intelligence in Ophthalmology: General Overview // Hindawi. Journal of Ophthalmology. 2018. N 6. P. 1-15. <https://doi.org/10.1155/2018/5278196> Article ID 5278196.
15. Siddharth Karuppasamy Karthikeyan, Rajesh Thangarajan, Nagarajan Theruvathi, Krithica Srinivasan. Android mobile applications in eye care // Oman Journal of Ophthalmology. 2019. Vol. 12, N 2. P. 73-77. https://doi.org/10.4103/ojo.OJO_226_2018.

References

1. Apreleva A. E., Mankibaeva R. I., Mankibaev B. S., Apreleva E. V. Primenenie sistem s iskusstvennym intellektom v diagnostike oftal'mologicheskikh zabolevanii (obzor literatury) [Application of systems with artificial intelligence in the diagnosis of ophthalmic diseases (literature review)]. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta = Bulletin of the Bashkir State Medical University*, 2019, no. 3, pp. 10-14.
2. Astakhov Yu. S., Turgel V. A. Telemeditsina v oftal'mologii. Chast' 1. "Obshchaya teleoftal'mologiya" [Telemedicine in ophthalmology. Part 1. "General teleophthalmology"]. *Oftal'mologicheskie vedomosti = Ophthalmological Statements*, 2020, vol. 13, no. 1, pp. 43–52. <https://doi.org/10.17816/OV19112>
3. Harry D. D., Sahakyan S. V., Khoroshilova-Maslova I. P., Tsygankov A. Yu., Nikitin O. I., Tarasov G. Yu. Metody mashinnogo obucheniya v oftal'mologii. Obzor literatury

[Machine learning methods in ophthalmology. Literature review.]. *Oftal'mologiya = Ophthalmology*, 2020, vol. 17, no. 1, pp. 20–31. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2020-1-20-31>

4. Gusev A. V. Perspektivy neironnykh setei i glubokogo mashinnogo obucheniya v sozdanii reshenii dlya zdavookhraneniya [Prospects of neural networks and deep machine learning in creating solutions for healthcare]. *Vrach i informatsionnye tekhnologii = Doctor and Information Technologies*, 2017, no. 3, pp. 92-105.

5. Kolesnichenko O. Yu., Martynov A. V., Pulit V. V., Kolesnichenko Yu. Yu., Shairov V. V., Varlamov O. O., Minushkina L. O., Sotnik A. Yu., Zhilina T. N., Dorofeev V. P., Smorodin G. N., Zhaparov M. K., Mazelis L. S. Sovremenniy peredovoi uroven' iskusstvennogo intellekta dlya umnoi meditsiny [Modern advanced level of artificial intelligence for smart medicine]. *Remedium. Zhurnal o rynke lekarstv i meditsinskoi tekhnike = Remedium. Journal of the Drug Market and Medical Technology*, 2019, no. 4, pp. 36 – 43. <https://doi.org/10.21518 / 1561-5936-2019-04-36-43>

6. Tereshchenko A. V., Trifanenkova I. G., Yudina Yu. A. Telemeditsina v skrininge, diagnostike i lechenii aktivnoi retinopatii nedonoshennykh [Telemedicine in screening, diagnosis and treatment of active retinopathy of prematurity]. *Oftal'mokhirurgiya = Ophthalmosurgery*, 2017, no. 2, pp. 73-77. <https://doi.org/10.25276/0235-4160-2017-2-73-77>

7. Fokin S. Yu., Kirichuk R. V. Obzor meditsinskikh prilozhenii, ustroystv i tekhnologii svyazi interneta veshchei [Review of medical applications, devices and communication technologies of the Internet of things]. *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii = Information Technologies and Telecommunications*, 2016, vol. 4, no. 4, pp. 67-80.

8. Lokman Balyen, Tunde Peto. Promising Artificial Intelligence – Machine Learning – Deep Learning Algorithms in Ophthalmology. *Asia-Pacific Academy of Ophthalmology*, 2019, vol. 8, no. 3, pp. 264-272. <https://doi.org/10.22608 / APO.2018479>

9. Mohita Sharma, Neha Jain, Sridhar Ranganathan, Naman Sharma, Santosh G. Honavar, Namrata Sharma, Mahipal S Sachdev. Tele-ophthalmology: Need of the hour. *Indian Journal of Ophthalmology*, 2020, vol. 68, no. 7, pp. 1328-1338. https://doi.org/10.4103/ijo.IJO_1784_20

10. Sourya Sengupta, Amitojdeep Singh, Henry A. Leopold, Vasudevan Lakshminarayanan. Ophthalmic Diagnosis and Deep Learning – A Survey. Available at: <http://www.arxiv.org>pdf/1812.07101v2.pdf>. (accessed 10.05.2021)

11. Julia E. Reid, Eric Eaton. Artificial Intelligence for Pediatric Ophthalmology. Available at: <http://www.arxiv.org>pdf/1904.08796.pdf>. (accessed 10.05.2021)

12. Lokeshwari Aruljyothi, Anuja Janakiraman, Malligarjun B., Balasundaram Manohar Babu. Smartphone applications in ophthalmology: A quantitative analysis. *Indian Journal of Ophthalmology*, 2021, vol. 69, no. 3, pp. 548-553. https://doi.org/10.4103 / ijo.IJO_1480_20

13. Muhammad Imran Razzak, Saeeda Naz, Ahmad Zaib. Deep Learning for Medical Image Processing: Overview, Challenges and Future. Available at: <https://www.arxiv.org/abs/1704.06825>. (accessed 10.05.2021)

14. Wei Lu, Yan Tong, Yue Yu, Yiqiao Xing, Changzheng Chen and Yin Shen. 5 Applications of Artificial Intelligence in Ophthalmology: General Overview5. *Hindawi. Journal of Ophthalmology*, 2018, no. 6, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1155/2018/5278196> Article ID 5278196

15. Siddharth Karuppasamy Karthikeyan, Rajesh Thangarajan, Nagarajan Theruvathi, Krithica Srinivasan. Android mobile applications in eye care. *Oman Journal of Ophthalmology*, 2019, vol. 12, no. 2, pp. 73-77. https://doi.org/10.4103/ojo.OJO_226_2018

Информация об авторе / Information about the Author

Добров Эльдар Робертович, аспирант кафедры прикладной информатики, Новосибирский государственный университет экономики и управления «НИНХ», г. Новосибирск, Российская Федерация,
e-mail: sib.2020@bk.ru

Eldar R. Dobrov, Post-Graduate Student of the Department of Applied Informatics, Novosibirsk State University of Economics and Management, Novosibirsk, Russian Federation,
e-mail: sib.2020@bk.ru

УДК 004.75

Алгоритм агрегирования квазистационарных измерительных данных сенсорных узлов

А. М. Павлов¹ ✉, В. А. Кудинов¹

¹ Курский государственный университет
ул. Радищева 33, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: vka_off@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Беспроводные сенсорные сети на сегодняшний день являются одним из активно развивающихся и перспективных направлений в информационно-коммуникационной области. Оптимизация вычислительной сложности алгоритмов обработки данных для устройств беспроводной сенсорной сети по-прежнему остается важной научно-технической задачей. Данная статья посвящена алгоритму, реализующему метод интеллектуального квазииндифферентного агрегирования данных для децентрализованных устройств – сенсорных узлов. Целью работы является дальнейшее совершенствование технологий агрегирования в беспроводных сенсорных сетях за счет создания нового алгоритма агрегирования квазистационарных измерительных данных сенсорных узлов. Разработанный алгоритм обеспечивает эффективное агрегирование квазистационарных измерительных данных сенсорных узлов за счет представления их в виде векторов коэффициентов модели параболической регрессии и группирования на основе корреляции динамических вариаций регистрируемых параметров, а также учитывает неопределенные значения и выбросы в сегментах данных, реализует их устранение.

Методы. При проведении теоретических исследований и разработке алгоритма в работе использовались методы теорий: алгоритмов, вероятностей и математической статистики, вычислений (в части теории сложности), а также пакет прикладных программ технических вычислений Matlab.

Результаты. Разработан алгоритм агрегирования квазистационарных измерительных данных сенсорных узлов, позволяющий сократить их объем при передаче через беспроводные каналы связи. Практическая значимость разработанного алгоритма заключается в доведении предложенных теоретических и алгоритмических конструкций до уровня программ.

Заключение. Разработанный алгоритм обеспечивает эффективное агрегирование за счет представления квазистационарных измерительных данных сенсорных узлов в виде векторов коэффициентов модели параболической регрессии, минимизирует временные и пространственные корреляции данных на приемной стороне, устраняет неопределенные значения и выбросы в сегментах данных, превосходящие три средних абсолютных отклонения.

© Павлов А. М., Кудинов В. А., 2021

Ключевые слова: агрегирование; беспроводная сенсорная сеть; вычислительная сложность; квазистационарные измерительные данные; нотация; сенсорный узел.

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

Для цитирования: Павлов А. М., Кудинов В. А. Алгоритм агрегирования квазистационарных измерительных данных сенсорных узлов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 3. С. 34–47.

Поступила в редакцию 11.07.2021

Подписана в печать 09.08.2021

Опубликована 30.09.2021

Algorithm for Quasi-Stationary Measurement Data Aggregation of Sensor Nodes

Aleksey M. Pavlov¹ ✉, Vitaliy A. Kudinov¹

¹ Kursk State University

33 Radischeva str., Kursk 305000, Russian Federation

✉ e-mail: vka_off@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Wireless sensor networks are actively developing and perspective direction in the information and communication field. Computational complexity optimization of data processing algorithms for wireless sensor network devices is still an important scientific and technical problem. This article is devoted to an algorithm that realized the method of intelligent quasi-indifferent data aggregation for decentralized devices – sensor nodes. The aim of the study is to further aggregation technologies improvement in wireless sensor networks by creating the new algorithm for quasi-stationary measurement data aggregation of sensor nodes. The developed algorithm ensures efficient quasi-stationary measurement data aggregation of sensor nodes by presenting this data in the form of the parabolic regression model coefficients vectors and combining them into groups based on the dynamic variations correlation of the recorded parameters, also takes into account undefined values and outliers in data segments and implements their elimination.

Methods. Methods of algorithms theories, probability theory, mathematical statistics, calculations in terms of complexity theory and technical calculations application software Matlab were used in the study during the theoretical research and algorithm development.

Results. The algorithm for quasi-stationary measurement data aggregation of sensor nodes that allows to reduce their volume when transmitting via wireless communication channels is developed. The practical significance of the developed algorithm lies in implementing the proposed theoretical and algorithmic structures to a level of programs.

Conclusion. The developed algorithm ensures efficient aggregation by presenting quasi-stationary measurement data of sensor nodes in the form of the parabolic regression model coefficients vectors, minimizes temporal and spatial correlations of data on the receiving side, eliminates undefined values and outliers in data segments exceeding three average absolute deviations.

Keywords: aggregation; wireless sensor network; computational complexity; quasi-stationary measurement data; notation; sensor node.

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

For citation: Pavlov A. M., Kudinov V. A. Algorithm for Quasi-Stationary Measurement Data Aggregation of Sensor Nodes. *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*. 2021; 11(3): 34–47. (In Russ.)

Received 11.07.2021

Accepted 09.08.2021

Published 30.09.2021

Введение

Одним из направлений в области информационно-коммуникационных технологий, которое активно развивается как в теоретических аспектах, так и в виде практических решений, является внедрение беспроводных сенсорных сетей (БСС) [1; 2; 3; 4]. Создание новых подходов к агрегированию измерительных данных в таких сетях порождает необходимость постоянного совершенствования алгоритмических решений, что отражено в работах [5; 6; 7].

Ключевым аспектом разработки современных алгоритмов, реализуемых в аппаратно-программной логике разнородных сенсорных узлов (СУ), является оптимизация их вычислительной сложности, что представляется важной научно-технической задачей. Достижение баланса между затрачиваемым процессорным временем выполнения и объемом требуемой для вычислений памяти в настоящее время способствует обеспечению высокого быстродействия технических систем.

Однако ещё не все вопросы, связанные с алгоритмическим обеспечением СУ, решены в полном объеме. Функционирование разрабатываемого для СУ

программного обеспечения ограничено необходимостью эффективного использования вычислительного ресурса и заряда автономных элементов электропитания. В таких условиях актуальной задачей, требующей первоочередного решения, является разработка эффективного с точки зрения вычислительной временной сложности алгоритма, реализующего метод интеллектуального квазииндифферентного агрегирования данных, который обеспечивает сокращение их количества при передаче через беспроводные каналы связи и тем самым приводит к сокращению энергопотребления.

Таким образом, целью исследования является дальнейшее совершенствование технологий агрегирования в БСС за счет создания нового алгоритма агрегирования квазистационарных измерительных данных (КИД) СУ.

Материалы и методы

Для разработки алгоритма целесообразно использовать общепринятые методы теории алгоритмов, теории вероятностей и математической статистики, теории сложности, а для его практической реализации – пакет прикладных программ технических вычислений

Matlab. Исходя из этого выберем форму представления и способ оценки алгоритма.

В качестве формы представления алгоритма (рис. 1) разумно использовать наиболее наглядную – графическое представление. Графическое представление алгоритма [8] подразумевает раз-

работку блок-схемы, на которой отображаются связанные между собой операционные блоки, соответствующие одному определенному шагу вычислений. Для простоты восприятия разрабатываемого алгоритма будем стремиться к минимизации ветвлений и цикличности блоков, а также максимизации их линейности.

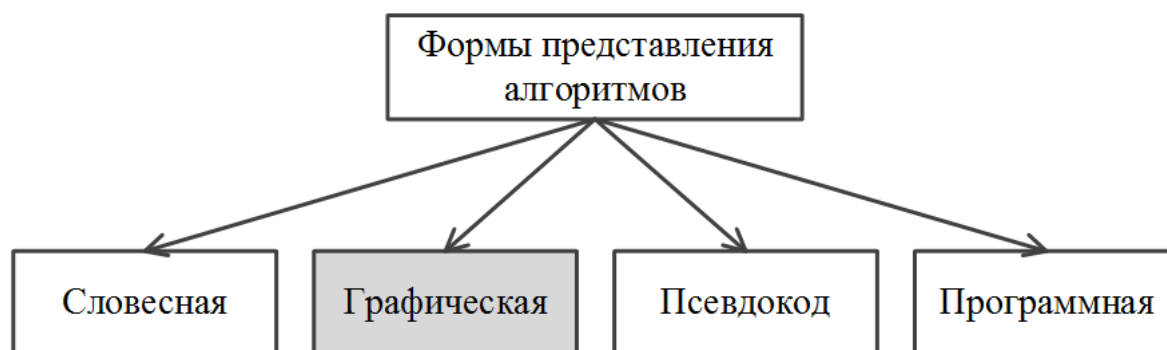


Рис. 1. Формы представления алгоритмов

Fig. 1. Algorithm presentation forms

Оценку алгоритма будем проводить по классическому критерию – вычислительной временной сложности [9; 10], которая связана с затратами процессорного времени на выполнение алгоритма.

При проектировании алгоритма необходимо обеспечить оптимальный баланс между скоростью его выполнения и объемом занимаемой памяти. Для оценки алгоритма, независимо от конкретной конфигурации, интересен подход, связанный с использованием абстрактного вычислителя – машины с произвольным доступом к памяти [11]. В связи с введенными ограничениями на

используемый вычислитель оценку вычислительной сложности алгоритма проведем с применением асимптотического анализа, который подразумевает описание алгоритма с помощью соответствующих асимптотических нотаций (АН) [12].

Результаты и их обсуждение

Разрабатываемый алгоритм агрегирования КИД СУ состоит из четырех этапов, каждый из которых обеспечивает выполнение соответствующей функциональной части метода интеллектуального квазииндифферентного агрегирования данных.

На первом этапе блоки № 1–8 (рис. 2) обеспечивают предварительную обработку данных СУ: накопление и коррекцию объема n выборки $X_{\langle n \rangle}$, установку длины сегмента l_{seg} , сегментирование выборки. В блоке № 8 обеспечивается проверка корректности введения КИД

СУ для выполнения дальнейших преобразований. При возникновении критической ситуации выводится ошибка (блок № 7). Коррекция объема выборки (блок № 2) проводится путем усечения её длины на величину остатка от деления r (блок № 4) в случае отличия его от нуля.

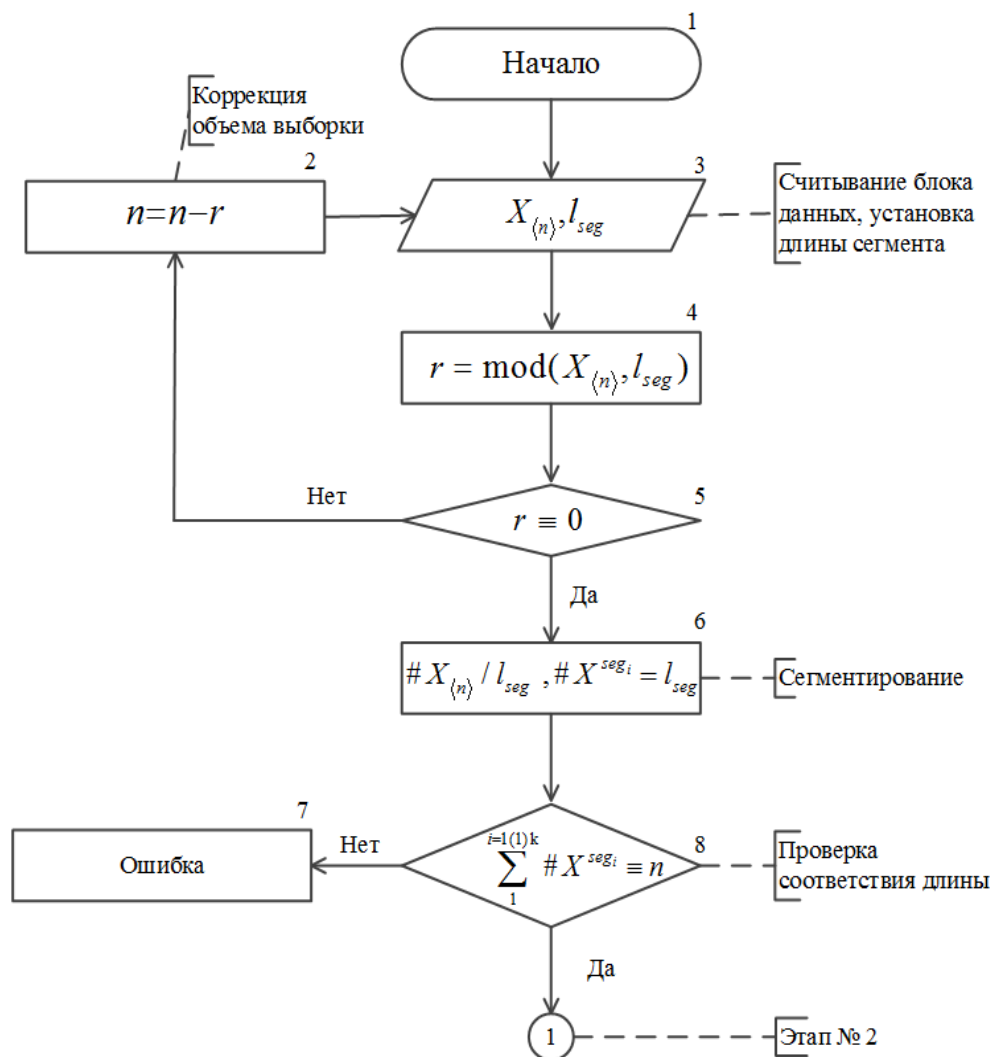


Рис. 2. Алгоритм агрегирования КИД СУ (этап 1)

Fig. 2. Algorithm for quasi-stationary measurement data aggregation of sensor nodes (stage 1)

Второй этап алгоритма представлен блоками № 9 – 25 (рис. 3–4). Блоками цикличности (№ 9, № 11, № 17, № 21, № 24, № 25) достигается последовательный выбор обрабатываемых сегментов и

их отдельных элементов с помощью управления переменными j и i соответственно. Блоки № 12 – 16 предназна-

чены для устранения в сегментированных КИД СУ элементов с неопределенными значениями NaN . В случае отсутствия возможности замены таких значений на значения соседних элементов сег-

мента управление передается в блок обработки ошибки № 10. Блоки № 18, № 20 отвечают за осуществление процедур расчета масштабируемого среднего абсолютного отклонения (САО) на основе медианного значения.

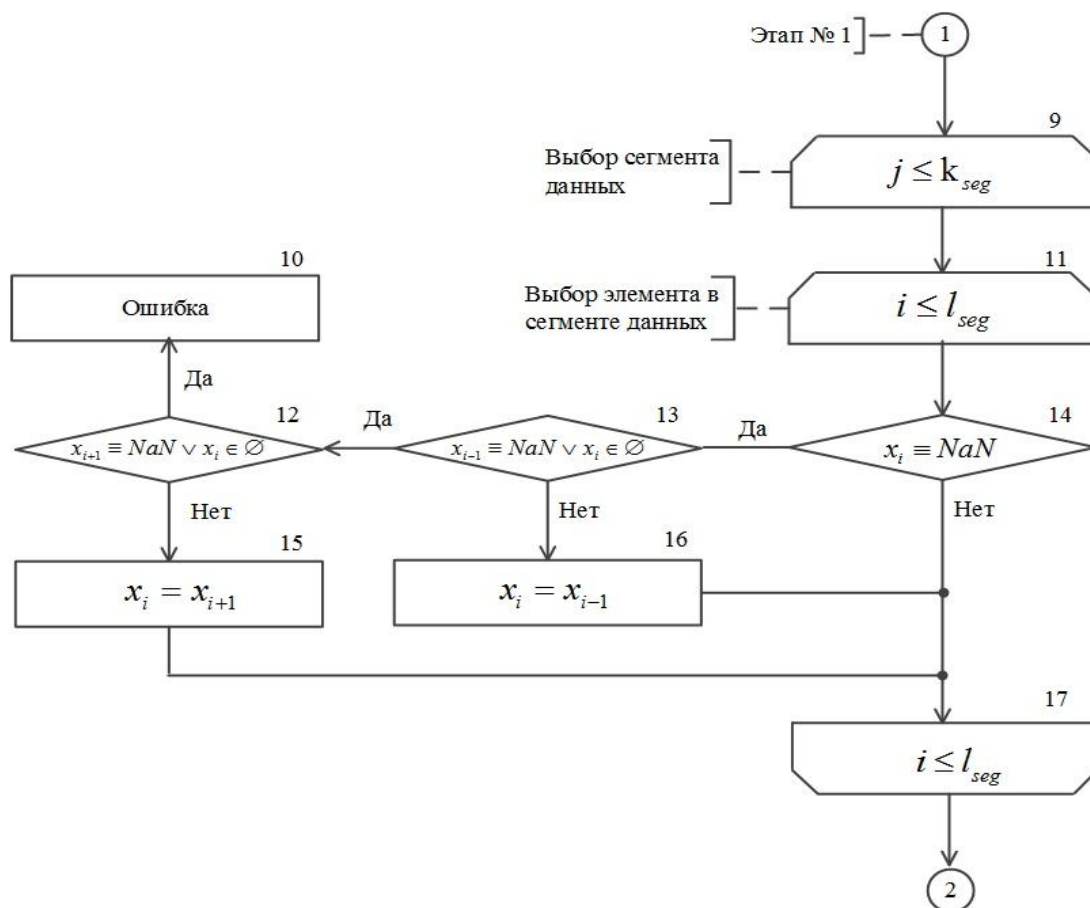


Рис. 3. Алгоритм агрегирования КИД СУ (этап 2, часть 1)

Fig. 3. Algorithm for quasi-stationary measurement data aggregation of sensor nodes (stage 2, part 1)

Пороговое значение САО P_{MAD} вводится блоком № 19. Циклический процесс поиска и устранения выбросов, превышающих пороговое значение САО более, чем в три раза, проводится в блоках алгоритма № 22 – 23. При этом устранение выброса производится заменой на

среднее значение между предыдущим и последующим элементом сегмента. На этом выполнение второго этапа алгоритма заканчивается, а КИД СУ с устраненными выбросами и неопределенными значениями передаются на следующий шаг обработки в блок № 26 (рис. 5).

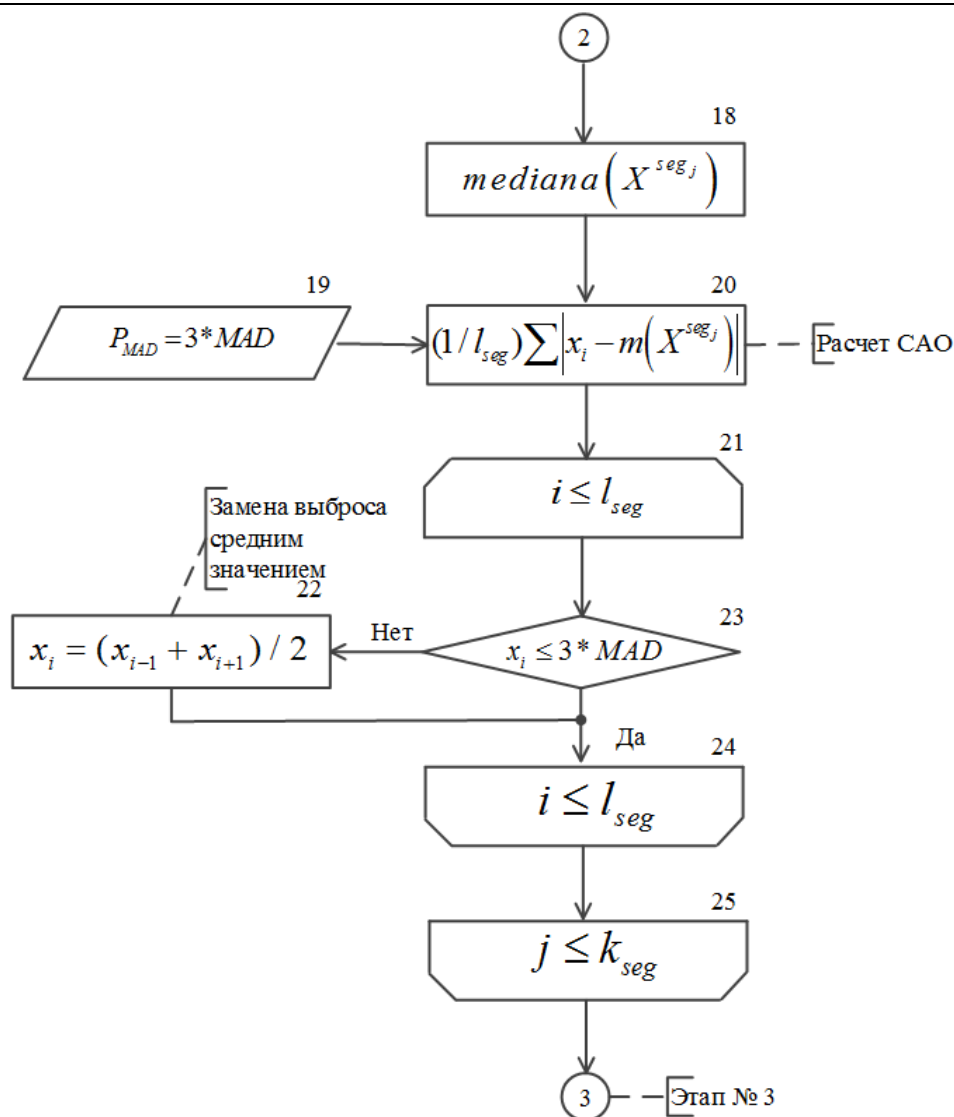


Рис. 4. Алгоритм агрегирования КИД СУ (этап 2, часть 2)

Fig. 4. Algorithm for quasi-stationary measurement data aggregation of sensor nodes (stage 2, part 2)

Блоки № 22, № 23 образуют линейный участок и функционально относятся к третьему этапу алгоритма, обеспечивающему представление сегментов КИД СУ в виде коэффициентов модели параболической регрессии (ПБР). Блоки № 26, № 32 отвечают за выполнение цикла выбора обрабатываемых сегментов. Блок № 27 задает модель ПБР [13] с помощью полинома второй степени. В блоке № 28 осуществляется выполнение

внешней процедуры, реализующей метод наименьших квадратов [14] и необходимой для поиска коэффициентов модели.

Найденные главный и дополнительные определители матрицы преобразуются в коэффициенты b_j в блоках № 29–31. Блок № 32 производит оценку качества приближения восстановленной с помощью коэффициентов модели ПБР

линии регрессии к фактическим значениям данных сегмента. Оценка качества приближения производится с применением критерия суммы квадратов ошибок

SSE (блок № 33) [15]. В блоке № 34 происходит формирование результирующего вектора коэффициентов ПБР для всех обработанных сегментов.

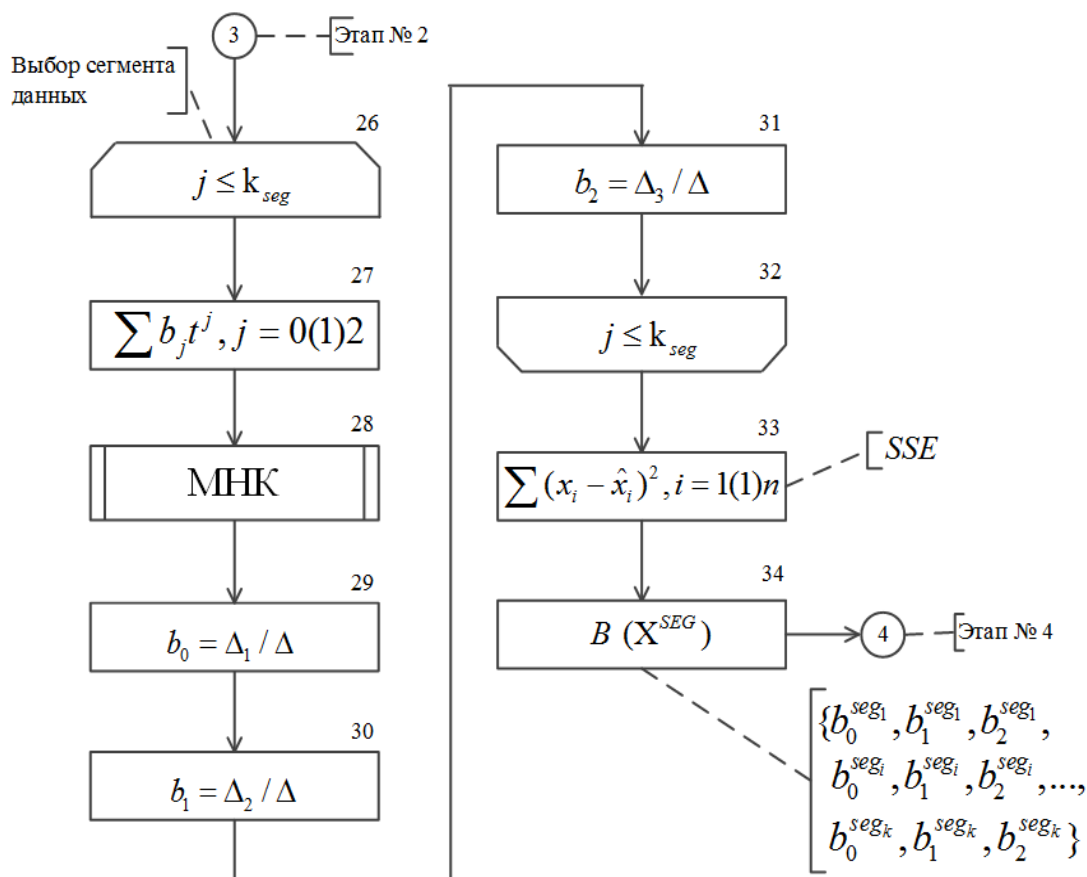


Рис. 5. Алгоритм агрегирования КИД СУ (этап 3)

Fig. 5. Algorithm for quasi-stationary measurement data aggregation of sensor nodes (stage 3)

Четвертый этап алгоритма представлен блоками № 35 – 42 (рис. 6) и предназначен для группирования СУ на основе корреляции динамических вариаций регистрируемого параметра. За циклический выбор сегментов k_{seg} в виде векторов модели ПБР отвечают блоки № 36, № 41. Блоком № 35 выполняется ввод векторов коэффициентов модели ПБР соседних СУ, полученных по беспроводному каналу связи.

Функция вычисления меры сходства между результирующими векторами коэффициентов ПБР текущего СУ и соседних СУ представлена блоком № 37, вычисляется с помощью расстояния Чебышева и представляет собой максимум модуля разности их компонент. Решение о включении соседнего СУ в группу принимается блоком № 39 на основе сравнения полученного значения с пороговым значением P_d , определяющим

сходство или различие векторов ПБР. В случае превышения рассчитанным расстоянием Чебышева $d^{CD}(B_j, B)$ поро-

вого значения соседний СУ не включается в группу (блок № 38), в противном случае – включается (блок № 40). Блок № 42 завершает выполнение алгоритма.

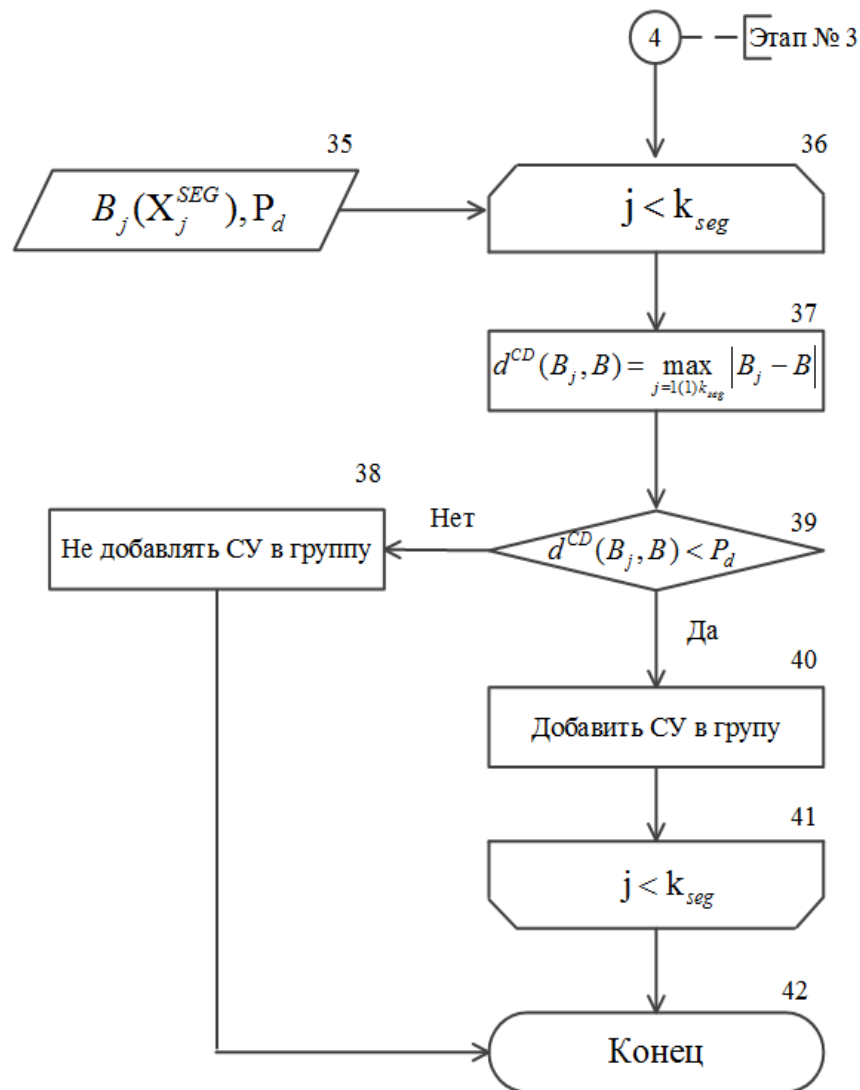


Рис. 6. Алгоритм агрегирования КИД СУ (этап 4)

Fig. 6. Algorithm for quasi-stationary measurement data aggregation of sensor nodes (stage 4)

Оценка вычислительной сложности алгоритма агрегирования КИД СУ

Проведем оценку сложности алгоритма с помощью O -нотации, описывающей верхнюю границу времени выполнения относительно размера входных

данных. В таком случае сложность алгоритма будет определяться суммарной сложностью реализуемых в нем процедур и функций, сложность каждой из которых возможно описать соответствующей

щей категорией алгоритмической сложности O -нотации: $O(1)$, $O(N)$, $O(\log N)$, $O(N \log N)$, $O(N^2)$.

Результирующая сложность первого этапа алгоритма составит $O(N)$, второго – $O(N^2)$, третьего – $O(N \log N)$, четвертого – $O(N)$. Для расчета итоговой сложности алгоритма будем придерживаться правил вычислений (сложения и умножения) в O -нотациях [9; 10; 11]:

- итоговая сложность двух последовательных действий равна сумме их сложностей;
- итоговая сложность алгоритма оценивается наихудшим из слагаемых;
- постоянные слагаемые (константы) в итоговой сложности не учитываются;
- при ветвлении выбирается вариант, обладающий худшей сложностью;
- итоговая сложность двух вложенных действий равна произведению их сложностей.

Тогда итоговая сложность всего алгоритма в общем виде будет определяться выражением $O(N^2)$. Нетрудно заметить, что алгоритм обладает средней сложностью $O(N^2)$, которая не превосходит сложности $O(N!)$ и $O(N^C)$, однако уступает в количестве затрачиваемого времени выполнения сложности $O(N)$.

Выводы

Разработанный алгоритм обеспечивает эффективное агрегирование КИД СУ за счет представления их в виде векторов коэффициентов модели ПБР и группирования на основе сходства динамики изменения регистрируемых параметров физических объектов; минимизирует временные и пространственные корреляции данных между СУ на приемной стороне, а также позволяет устранять неопределенные значения и выбросы в сегментах данных, превосходящие три САО.

Алгоритм квазииндифферентен к типу обрабатываемых данных и может использоваться для агрегирования измерительных данных СУ, оснащенных как цифровыми, так и аналоговыми сенсорами, после предварительного аналого-цифрового преобразования непрерывно регистрируемых ими значений. Обладает средней вычислительной сложностью, не превосходящей сложность рекурсивных алгоритмов, однако уступает в сложности простым линейным алгоритмам.

Практическая значимость разработанного алгоритма агрегирования КИД СУ заключается в доведении предложенных теоретических и алгоритмических конструкций агрегирования КИД СУ в БСС до уровня программ, что подтверждается свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ [16; 17; 18].

Список литературы

1. Нуриллоев И. Н. Разработка и исследование методов обеспечения связности в беспроводных сенсорных сетях: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2018. 170 с.
2. Забарин М. А., Пономарчук Ю. В. Технологии гетерогенных беспроводных сенсорных сетей с использованием беспилотных летательных аппаратов при решении поисковых задач и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций // Вестник российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2019. № 4. С. 94–100.
3. Шахов В. В., Стрельников В. Е., Нгуен Ван Дюк. К вопросу об эффективности беспроводных сенсорных сетей // Проблемы информатики. 2014. № 2. С. 28–38.
4. Голубничая Е. Ю. Агрегирование данных в беспроводных сенсорных сетях мониторинга // Проблемы передачи информации в инфокоммуникационных системах: сборник докладов и тезисов XIII Всероссийской научно-практической конференции (26 мая 2017 г.) / Волгоградский государственный университет. Волгоград, 2017. С. 37–42.
5. Воронухин М. Е. Анализ вычислительной сложности алгоритмов оптимизации // Наука и образование транспорту. 2018. № 2. С. 19–23.
6. Метод агрегации и нормализации данных гетерогенной сенсорной сети / М. А. Колчин, И. А. Шилин, Н. В. Климов, Д. С. Гарайзуев, Д. И. Муромцев, Д. А. Заколдаев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 11. С. 945–951. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2015-58-11-945-951>.
7. Аль-Кадами Н. А. Оценка и сравнительный анализ алгоритмов маршрутизации для гомогенных и гетерогенных беспроводных сенсорных сетей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2014. Т. 8, № 4. С. 4–22.
8. Развитие графовых и матричных способов представления алгоритмов / В. С. Поляков, С. В. Поляков, О. А. Авдеюк, В. Ю. Наумов, Е. С. Павлова, М. Г. Скворцов // Инженерный вестник Дона. 2017. № 2. С. 8.
9. Алгоритмы / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн // Построение и анализ. Издание 3-е. М.: Вильямс, 2013. 1324 с.
10. Коварцев А. Н., Даниленко А. Н. Алгоритмы и анализ сложности. Самара: Издательство Самарского государственного университета, 2018. 128 с.
11. Aho A. V., Hopcroft J. E., Ullman J. D. The Design and Analysis of Computer Algorithms. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1974. 479 p.
12. Greene D. H., Knuth D. E. Mathematics for the Analysis of Algorithms. Boston: Birkhäuser, 1982. 120 p.

13. Draper N., Smith H. *Applied Regression Analysis*. 3rd ed. Canada: John Wiley & Sons, 1998. 912 p.
14. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. H. *The Elements of Statistical Learning*. 2nd ed. New York: Springer, 2009. 745 p.
15. Chi-Lun Cheng, John W. Van Ness. *Statistical Regression with Measurement Error: Kendall's Library of Statistics 6*. 1st ed. Canada: Wiley & Sons, 2010. 282 p.
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Российская Федерация. Программа аппроксимации данных беспроводных сенсорных узлов кусочно-полиномиальной регрессией / А. М. Павлов. № 2021611364; заявл. 18.01.21; опубл. 26.01.21.
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Российская Федерация. Программа интеллектуального квазииндифферентного агрегирования данных в беспроводных сенсорных сетях / А. М. Павлов. № 2020666390; заявл. 01.12.20; опубл. 09.12.20.
18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Российская Федерация. Программа оценки энергоэффективности агрегирования данных в беспроводных сенсорных сетях / А. М. Павлов. № 2021610705; заявл. 11.01.2021; опубл. 19.01.21.

References

1. Nurilloev I. N. *Razrabotka i issledovanie metodov obespecheniya svyaznosti v besprovodnyh sensoryh setyah*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development and Research of Methods for Ensuring Connectivity in Wireless Sensor Networks. Cand. techn. sci. diss.]. St. Petersburg, 2018. 170 p.
2. Zabarin M. A., Ponomarchuk Yu. V. *Tekhnologii geterogennyh besprovodnyh sensoryh setej s ispol'zovaniem bespilotnyh letatel'nyh apparatov pri reshenii poiskovyh zadach i likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij* [Technologies of Heterogeneous Wireless Sensor Networks Using Unmanned Aerial Vehicles in Solving Search Problems and Eliminating the Consequences of Emergency Situations]. *Vestnik rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie = News of the Russian New University. Series: Complex Systems: Models, Analysis and Control*, 2019, no. 4, pp. 94–100.
3. Shahov V. V., Strelnikov V. E., Nguen Van Dyuk. *K voprosu ob effektivnosti besprovodnyh sensoryh setej* [On the Question of the Effectiveness of Wireless Sensor Networks]. *Problemy informatiki = Problems of Informatics*, 2014, no. 2, pp. 28–38.
4. Golubnichaya E. Yu. [Data aggregation in Wireless Sensor Monitoring Networks]. *Problemy peredachi informatsii v infokommunikatsionnyh sistemah. Spornik dokladov i tesisov XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems of Information

Transfer in Infocommunication Systems. Materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference]. Volgograd, Volgograd State University Publ., 2017, pp. 37–42. (In Russ.)

5. Voronuhin M. E. Analiz vychislitel'noj slozhnosti algoritmov optimizacii [Analysis of the Computational Complexity of Optimization Algorithms]. *Nauka i obrazovanie transportu = Science and Education for Transport*, 2018, no. 2, pp. 19–23.

6. Kolchin M. A., Shilin I. A., Klimov N. V., Garajzuev D. S., Muromcev D. I., Zakoldaev D. A. Metod agregacii i normalizacii dannyh geterogennoj sensornoj seti [Aggregation and Normalization Method for Heterogeneous Sensor Network Data]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie = Proceedings News of Higher Education Institutions. Instrument-Making Industry*, 2015, vol. 58, no. 11, pp. 945–951. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2015-58-11-945-951>

7. Al'-Kadami N. A. Ocenka i sravnitel'nyj analiz algoritmov marshrutizacii dlya gomogennyh i geterogennyh besprovodnyh sensornyh setej [Assessment and Comparative Analysis of Routing Algorithms for Homogeneous and Heterogeneous Wireless Sensor Networks]. *Informacionnye tekhnologii i telekommunikacii = Information Technology and Telecommunications*, 2014, vol. 8, no. 4, pp. 4–22.

8. Polyakov V. S., Polyakov S. V., Avdeyuk O. A., Naumov V. Yu., Pavlova E. S., Skvortcov M. G. Razvitie grafovyyh i matrichnyh sposobov predstavleniya algoritmov [Development of Graph and Matrix Ways of Representing Algorithms]. *Inzhenernyj vestnik Dona = Engineering Don Proceedings*, 2017, no. 2, p. 8.

9. Kormen T., Lejzerson Ch., Rivest R., Shtajn K. Algoritmy. Postroenie i analiz [Algorithms. Construction and Analysis]. 3rd ed. Moscow, Williams Publ., 2013. 1324 p.

10. Kovarcev A. N., Danilenko A. N. Algoritmy i analiz slozhnosti [Algorithms and Complexity Analysis]. Samara, Samara State University Publ., 2018. 128 p.

11. Aho A. V., Hopcroft J. E., Ullman J. D. The Design and Analysis of Computer Algorithms. Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company, 1974. 479 p.

12. Greene D. H., Knuth D. E. Mathematics for the Analysis of Algorithms. Boston, Birkhäuser, 1982. 120 p.

13. Draper N., Smith H. Applied Regression Analysis. 3rd ed. Canada, John Wiley & Sons, 1998. 912 p.

14. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. H. The Elements of Statistical Learning. 2nd ed. New York, 2009. 745 p.

15. Chi-Lun Cheng, John W. Van Ness. Statistical Regression with Measurement Error: Kendall's Library of Statistics 6. 1st ed. Canada, Wiley & Sons, 2010. 282 p.

16. Pavlov A. M. Programma approksimacii dannyh besprovodnyh sensornyh uzlov kusochno-polinomial'noj regressiej [Program for Approximating Data of Wireless Sensor Nodes by Piecewise Polynomial Regression]. Certificate of State Registration of a Computer Program RF, no. 2021611364, 2021.

17. Pavlov A. M. Programma intellektual'nogo kvaziindifferentnogo agregirovaniya dannyh v besprovodnyh sensoryh setyah [The Program of Intelligent Quasi-Indifferent Data Aggregation in Wireless Sensor Networks]. Certificate of State Registration of a Computer Program RF, no. 2020666390, 2020.

18. Pavlov A. M. Programma ocenki energoeffektivnosti agregirovaniya dannyh v besprovodnyh sensoryh setyah [Program for assessing the energy efficiency of data aggregation in wireless sensor networks]. Certificate of State Registration of a Computer Program RF, no. 2021610705, 2021.

Информация об авторах / Information about the Authors

Павлов Алексей Михайлович, ассистент
кафедры программного обеспечения
и администрирования информационных
систем, Курский государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: vka_off@mail.ru

Aleksey M. Pavlov, Assistant of the Department
of Software and Information Systems
Administration, Kursk State University, Kursk,
Russian Federation,
e-mail: vka_off@mail.ru

Кудинов Виталий Алексеевич, доктор
педагогических наук, профессор, профессор
кафедры программного обеспечения
и администрирования информационных систем,
Курский государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: kudinovva@yandex.ru

Vitaliy A. Kudinov, Dr. of Sci. (Pedagogic),
Professor, Professor of the Department
of Software and Information Systems
Administration, Kursk State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: kudinovva@yandex.ru

УДК 004.89

Метод и алгоритмы декодирования электрофизиологических сигналов в биотехнических системах реабилитационного типа

А. А. Трифонов¹, С. А. Филист¹ ✉, Е. В. Петрунина², А. А. Кузьмин¹,
Р. И. Сафронов³, Е. В. Крикунова¹

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

² Московский государственный гуманитарно-экономический университет
ул. Льва Яшина 7-14, г. Москва 111674, Российская Федерация

³ Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова
ул. К. Маркса 70, г. Курск 305021, Российская Федерация

✉ e-mail: SFilist@gmail.ru

Резюме

Цель исследования – разработка метода декодирования электромиосигналов в системах управления экзоскелетами с виртуальной реальностью, позволяющих адаптировать программу реабилитации робототехнического устройства к функциональному состоянию пациента.

Методы. Для восстановления двигательных функций нижних конечностей постинсультных больных предлагается использовать биотехническую систему с робототехническим устройством, управление которым основано на анализе и классификации электромиосигналов. Робототехническое устройство управляется посредством нечеткой нейронной сети. Формирование вектора информативных признаков для нейронной сети осуществляют посредством многоуровневого компаратора, число уровней которого определяется размерностью вектора информативных признаков, определяемых путем усреднения выходов компараторов в скользящем окне. Дешифратор электромиосигналов включает последовательно соединенные блок компараторов, блок вычисления информативных признаков, мультиплексор, первую нейронную сеть, блок памяти и вторую нейронную сеть, выходы которой предназначены для подключения к контроллеру серводвигателей, и синхронизатор, выходом подключенный к входам управления мультиплексора, блока памяти и контроллера серводвигателей.

Результаты. Разработан классификатор электромиосигналов, отличающийся использованием множества дублирующих каналов ЭМГ-сигналов, связанных с мышцей или группами мышц, контролирующими движение одного и того же сустава конечностей, в результате чего на выходе классификатора каждого канала получаем число, соответствующее уверенности в команде на вращение серводвигателя экзоскелета, все выходы классификаторов каналов поступают на нечеткую нейронную сеть, дефuzziфикатор которой формирует управляющий сигнал на контроллер серводвигателя. В ходе работы написано программное приложение, способное управлять экзоскелетом при помощи анализа электромиосигналов.

Заключение. Исследование показало, что можно изменить показатели клинического исхода у пациентов с подострым переживанием инсульта после 12 сеансов БТС-тренинга. Биотехническая система с нечетким управлением робототехническим устройством позволяет осуществлять индивидуальную стратегию реабилитации постинсультных больных (включая целенаправленную тренировку ходьбы).

Ключевые слова: электромиосигнал; модуль управления; нечеткая нейронная сеть; реабилитация постинсультных больных; робототехническое устройство; алгоритм.

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

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90112.

Для цитирования: Метод и алгоритмы декодирования электрофизиологических сигналов в биотехнических системах реабилитационного типа / А. А. Трифонов, С. А. Филист, Е. В. Петрунина, А. А. Кузьмин, Р. И. Сафронов, Е. В. Крикунова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 3. С. 48–77.

Поступила в редакцию 07.07.2021

Подписана в печать 05.08.2021

Опубликована 30.09.2021

Method and Algorithms for Decoding Electrophysiological Signals in Biotechnical Systems of Rehabilitation Type

Andrey A. Trifonov¹, Sergei A. Philist¹ ✉, Elena V. Petrunina²,
Alexander A. Kuzmin¹, Ruslan I. Safronov³, Evgeniya V. Krikunova¹

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

² Moscow State University for the Humanities and Economics
7-14 Lev Yashin st., Moscow 111674, Russian Federation

³ Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov
70 K. Marx str., Kursk 305021, Russian Federation

✉ e-mail: SFilist@gmail.ru

Abstract

Purpose of research. Development of a method for decoding electromyosignals in control systems for exoskeletons with virtual reality, allowing to adapt the rehabilitation program of a robotic device to the functional state of the patient.

Methods. To restore the motor functions of the lower extremities of post-stroke patients, it is proposed to use a biotechnical system with a robotic device, the control of which is based on the analysis and classification of electromyosignals. The robotic device is controlled by a fuzzy neural network. The formation of the vector of informative features for the neural network is carried out by means of a multilevel comparator, the number of levels of which is determined by the dimension of the vector of informative features determined by averaging the outputs of the comparators in a sliding window. The electromyosignal decoder includes a series-connected block of comparators, a block for calculating informative features, a multiplexer, a first neural network, a memory block and a second neural

network, the outputs of which are intended to be connected to a servo motor controller, and a synchronizer connected by an output to the control inputs of the multiplexer, memory unit and servo motor controller.

Results. A classifier of electromyosignals has been developed, which is characterized by the use of multiple duplicate channels of EMG signals associated with a muscle or muscle groups that control the movement of the same joint of the extremities, as a result of which, at the output of the classifier of each channel, we obtain a number corresponding to the confidence in the command to rotate the servo motor of the exoskeleton, all the outputs of the channel classifiers are fed to a fuzzy neural network, the defuzzifier of which generates a control signal to the servo motor controller. In the course of the work, a software application was written that can control the exoskeleton using the analysis of electromyosignals.

Conclusion. The study showed that it is possible to change the indicators of clinical outcome in patients with subacute stroke experience after 12 sessions of BPS training. A biotechnical system with fuzzy control of a robotic device allows for an individual strategy for the rehabilitation of post-stroke patients (including targeted walking training).

Keywords: electromyosignal; control module; fuzzy neural network; rehabilitation of post-stroke patients; robotic device; algorithm.

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

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90112.

For citation: Trifonov A. A., Philist S. A., Petrunina E. V., Kuzmin A. A., Safronov R. I., Krikunova E. V. Data segmentation in object recognition tasks. *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*. 2021; 11(3): 48–77. (In Russ.)

Received 07.07.2021

Accepted 05.08.2021

Published 30.09.2021

Введение

В последние годы в биотехнических системах реабилитационного типа большое распространение получили робототезированные устройства (экзоскелеты). Одним из способов реабилитации с помощью этих устройств является вертикализация, т. е. переход из положения «сидя» в положение «стоя» [1; 2; 3]. Клиническое применение вертикализации доказало высокую эффективность в проведении реабилитационной терапии при самых различных неврологических нарушениях. Вертикализаторы способствуют освоению двигательных действий и развитию функций нижних конечностей.

На рисунке 1 показан процесс вертикализации пациента с опорой для рук,

которая выступает в качестве простейшего реабилитационного изделия.

При правильном и систематическом применении вертикализаторов повышается уравновешенность и подвижность процессов торможения и возбуждения в центральной нервной системе, нормализуются моторно-висцеральные рефлекторные связи, снижается мышечный тонус, улучшается координация движений.

Применение вертикализации позволяет одновременно достичь нескольких целей:

- предотвратить образование сгибательных контрактур в тазобедренных и коленных суставах;

– помочь при профилактике когнитивных нарушений, отсутствии мотивации пациента к вертикальному положению, спастичности и нарушении мышечного тонуса нижних конечностей, не позволяющих пациенту самостоятельно стоять без совершения патологических движений и принятия патологических поз;

– помочь освоить двигательные действия и развить функции верхних конечностей;

– восстановить мышечную силу ног, избежать атрофии мышц;

– восстановить навыки ходьбы;

– плавно адаптировать сердечно-сосудистую систему к физическим нагрузкам;

– предотвратить пролежни, пневмонию, нарушения мочеиспускания, дефекации и другие осложнения, связанные с длительной неподвижностью.

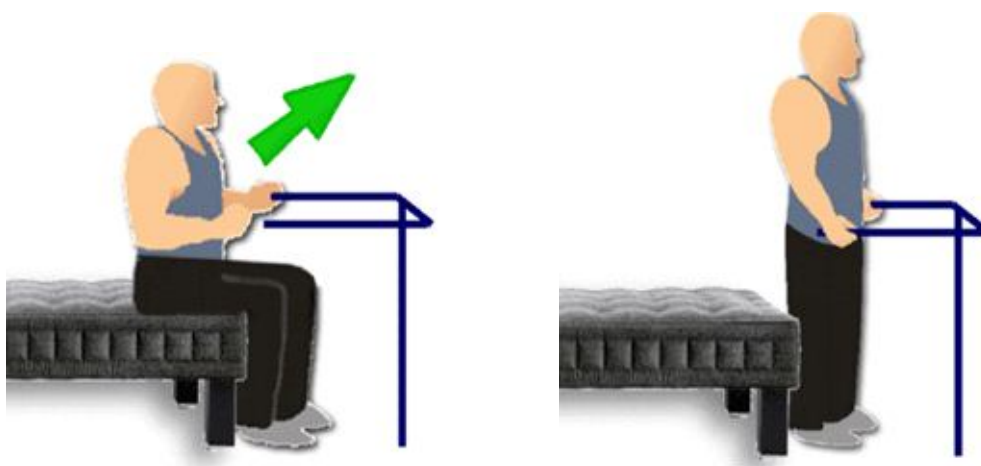


Рис. 1. Вертикализация постинсультного пациента с опорой для рук в качестве альтернативы экзоскелета

Fig. 1. Verticalization of the post-stroke patient with arm support as an alternative to the exoskeleton

Несмотря на многочисленные реабилитационные экзоскелеты на рынке медицинских услуг, на сегодняшний день нет эффективных алгоритмов, обеспечивающих устойчивое перемещение пациента в экзоскелете в процессе вертикализации, открытыми остаются вопросы математического моделирования поведения пациента в экзоскелете. Основной претензией к медицинским

экзоскелетам со стороны специалистов является отсутствие возможности адаптации экзоскелета к конкретному пациенту, поэтому очень часто предпочитают более дешевые и более эффективные средства реабилитации по технологии вертикализации пациента.

Наиболее распространенные патологии двигательной системы характеризуются потерей возможности совершать

целенаправленные моторные акты в результате нарушения у пациента связи между центральными отделами нервной системы и периферической мускулатурой. При этом функции, лежащие в основе программирования движений в коре головного мозга, могут оставаться сохранными.

В случае, когда у больного отсутствуют остаточные двигательные функции в паретичной конечности, единственным методом стимулирования пластических механизмов мозга, направленных на восстановление двигательных функций, является воображение движений. Идея совместить активацию моторных областей мозга с помощью воображения движений с контролем степени этой активации по биологической обратной связи лежит в основе использования для реабилитации постинсультных и посттравматических больных интерфейсов мозг-компьютер (ИМК), позволяющих распознавать паттерны ЭЭГ при воображении движений [4]. Данные ЭЭГ передаются в компьютер в реальном времени для их синхронной обработки и выделения сигналов, ответственных за воображение движения. Классификация паттернов ЭЭГ осуществляется классификатором, построенным, например, по методу Байеса. Результаты распознавания выполняемого ментального задания предъявляют больному по зрительной обратной связи с

подтверждением правильности выполнения задания на экране монитора [4]. Однако, несмотря на наличие множества подходов к количественному анализу ЭЭГ в приложениях ИМК, они не обеспечивают требуемой точности классификации, необходимой для создания систем, удобных для использования в повседневной жизни. Поэтому актуальной остается разработка более эффективных методов управления робототехническими устройствами биотехнических систем путем стимуляции потенциалов двигательных единиц (ДЕ) и дешифрации паттернов поверхностной электромиограммы (пЭМГ).

Материалы и методы

Метод дешифрации электромиосигналов и устройство для его реализации

Для того чтобы различать и классифицировать мышечные движения, должны быть извлечены наиболее значимые части ЭМС (признаки), которые представляют текущий сигнал в виде кода, несущего информацию о конкретном перемещении конечностей. Эта информация расшифровывается в декодере или классификаторе. По данным исследований, для классификации ЭМС применяются различные способы кодирования: спектральные коэффициенты, коэффициенты авторегрессии, вейвлет-коэффициенты. Однако, учитывая временные ограничения на дешифрацию команды

на ДЕ, предпочтения отдают способам кодирования ЭМС во временной области на основе анализа амплитуд сигналов. Такие признаки могут быть легко определены, обладают высокой стабильностью для распознавания образов с помощью нейронных сетей (НС) [5; 6; 7; 8; 9]. Для достижения лучших результатов в распознавании команд код (вектор признаков) должен содержать достаточное количество информации, чтобы отражать существенные свойства пЭМГ. Следовательно, основным требованием к коду является его простота получения и скорость его декодирования (классификации команды). В качестве признаков используют следующие величины во временной области, измеренные как функции времени: интегральная ЭМГ; среднее арифметическое; среднее значение модуля; конечные разности; сумма элементарных площадей; дисперсия; среднеквадратичное отклонение; длина сигнала; максимальное значение пЭМГ. Более подробно информация о выборе признаков для классификации изложена в работе [10].

При классификации пЭМГ используется обработка сигнала в окне [11], которая предназначена для дешифрации потенциалов ДЕ. Для ее реализации используется устройство, содержащее по меньшей мере один датчик, реагирующий на выполняемые пользователем движения, и процессор, коммуникативно соединенный по меньшей мере с

одним датчиком. Посредством этого устройства осуществляется сегментирование по меньшей мере одного сигнала на окна данных, после чего процессор определяется класса окна данных из библиотеки классов окон. Процессор выбирает наиболее вероятное движение из библиотеки классов окон, соответствующее текущему окну [12].

Недостатком этого подхода к идентификации типа движений является технология классификации данных, которая предполагает соотнесение одного свойства окна данных с определенным классом, что приводит к привязке к одному окну нескольких классов движений и необходимости вычисления наиболее вероятного класса для текущего окна.

Хотя, по утверждению авторов, система позволяет повысить точность позиционирования и принятия решения по выполнению команд, но ей присущ недостаток, связанный с тем, что при формировании вектора информативных признаков на основе анализа пЭМГ в окне используются только амплитудные характеристики отсчетов пЭМГ, что приводит к потере информативности сигнала пЭМГ и высокому уровню ошибок в классификации команд.

Для повышения точности при позиционировании экзоскелета посредством серводвигателей, управляемых по командам, получаемым по результатам де-

кодирования электромиосигнала, в данной системе предлагается использовать дублирование пЭМГ по нескольким каналам и расшифровки сформированного таким образом вектора информативных признаков посредством обучаемой НС. Однако такое техническое решение может быть использовано только при съеме сигналов с верхних или нижних конечностей и неприемлемо при дешифрации пЭМГ мышц спины, расшифровка которых необходима при управлении реабилитационными экзоскелетами в режиме «встать-сесть» или промышленными экзоскелетами в режиме «ассистент» при подъеме груза. Кроме того, использование дублирующих каналов не приводит к повышению информативности сигнала, а, скорее всего, позволяет повысить его помехозащищенность. Это обстоятельство влечет за собой снижение надежности нейросетевого классификатора, на входы которого подаются высокоррелированные признаки, полученные на основе анализа сигналов, зависящих не только от сигнала пЭМГ, но и от места положения электрода в текущем эксперименте или от различной динамики изменения кожного сопротивления под электродами в процессе эксперимента, что не может быть учтено в процессе обучения НС.

В предлагаемый метод дешифрации электромиосигналов, позволяющий ми-

нимизировать ошибки при позиционировании экзоскелета, состоит из следующих этапов:

- получение по меньшей мере одного пЭМГ пациента посредством миоэлектрического устройства считывания;
- обработка по меньшей мере одного пЭМГ пациента посредством сегментации пЭМГ на пересекающиеся или на непересекающиеся окна;
- формирование для каждого сегмента, полученного на предыдущем шаге, набора признаков пЭМГ (вектора информативных признаков) посредством многоуровневого компаратора, число уровней которого определяется размерностью вектора информативных признаков, а компоненты вектора информативных признаков вычисляются согласно выражению

$$FD_i = \frac{1}{TW} \sum_{\tau}^{TW} y_{\tau}, \quad (1)$$

где TW – ширина окна в отсчетах;

i – i -й номер уровня компаратора,

$i = \overline{1, N}$;

τ – номер отсчета в i -м окне;

$$y_{\tau} = \begin{cases} 1, & \text{если } |x_{\tau}| \geq \Theta_i; \\ 0, & \text{если } |x_{\tau}| < \Theta_i; \end{cases} \quad (2)$$

Θ_i – величина i -го порога;

- передача набора признаков пЭМГ каждого сегмента по каналу передачи данных на обучаемый классификатор, выполненный в виде нейронной сети,

осуществляющий управление контроллером серводвигателей, в котором используется вторая НС, предназначенная для обобщения данных, получаемых при классификации вектора информативных признаков текущего окна, число входов которой определяется числом окон ЭМГ-сигнала, используемых при принятии решения о включении/выключении соответствующего серводвигателя.

С целью адаптации процесса вертикализации к ФС пациента в дешифраторе используется множество дублирующих каналов пЭМГ, связанных с мышцей или группами мышц, контролирующими движение одного и того же сустава конечностей, в результате чего на выходе классификатора каждого канала получаем число, соответствующее уверенности в команде на вращение серводвигателя экзоскелета, а для агрегации решений по каналам классификаторов все

выходы классификаторов каналов поступают на нечеткую нейронную сеть, дефuzziфикатор которой формирует управляющий сигнал на контроллер серводвигателя, в результате анализа которого контроллер определяет скорость и направление вращения.

По желанию ЛПР при классификации пЭМГ на каждом шаге принятия решений данные с первой НС обновляются полностью или обновляется только тот выход НС, который пришел первым, а все остальные компоненты вектора информативных признаков второй НС сдвигаются на один шаг.

Структурная схема биотехнической системы реабилитации постинсультных больных, которая предназначена для реализации предлагаемого метода, представлена на рисунке 2. Она включает блок электродов 1, блок обработки пЭМГ 2; бортовой процессор 3 и контроллер серводвигателей 4.

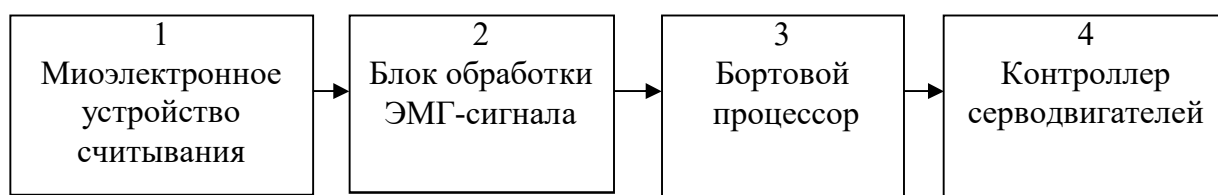


Рис. 2. Структурная схема биотехнической системы для реабилитации постинсультных больных

Fig. 2. Block diagram of the biotechnical system for the rehabilitation of post-stroke patients

Бортовой процессор осуществляет дешифрацию электромиосигналов посредством нейросетевого классификатора. Дешифратор электромиосигналов

включает последовательно соединенные блок компараторов, блок вычисления информативных признаков, мультиплексор, первую нейронную сеть, блок

памяти и вторую нейронную сеть, выходы которой предназначены для подключения к контроллеру серводвигателей, и синхронизатор, выходом подключенный к входам управления мультимплексора, блока памяти и контроллера

серводвигателей. Структурная схема дешифратора электромиосигналов для одного канала ЭМС, которая реализована в бортовом процессоре на аппаратно-программном уровне, представлена ниже (рис. 3).

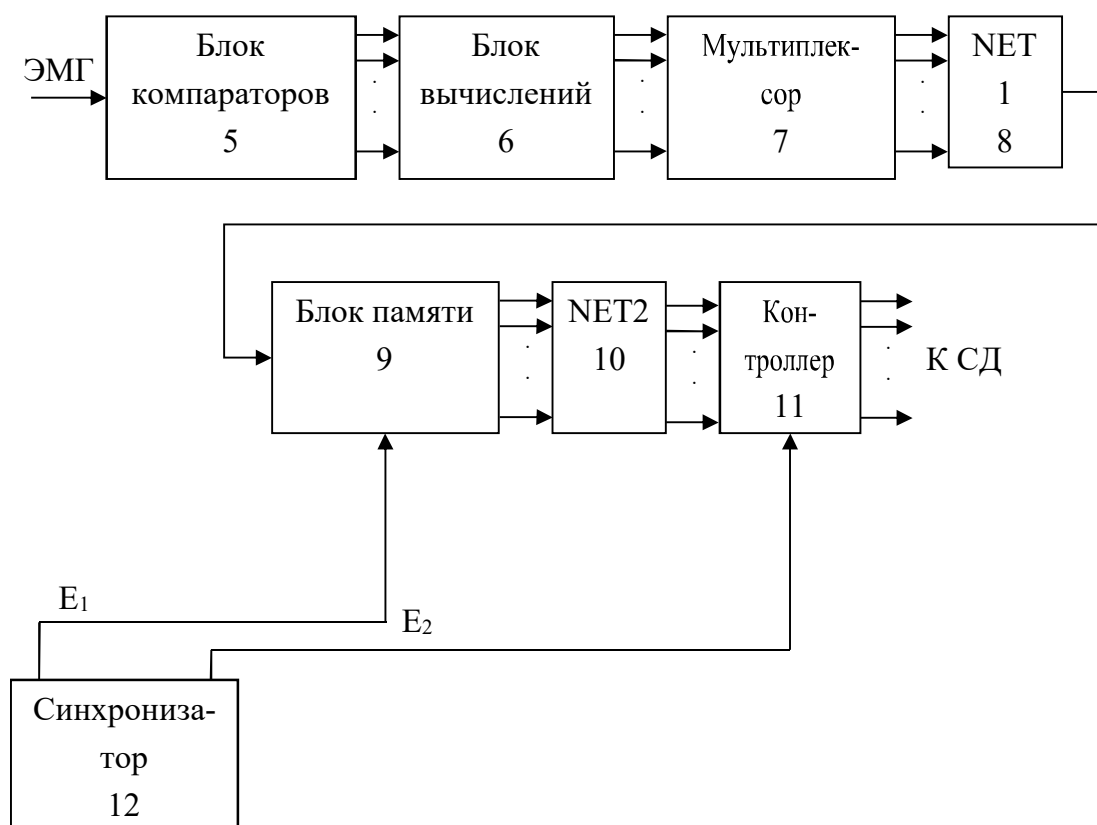


Рис. 3. Структурная схема классификатора для одного канала электромиосигнала

Fig. 3. Block diagram of the classifier for one electromyogram channel

Сущность метода заключается в сегментации текущего пЭМГ на пересекающиеся или не пересекающиеся окна шириной TW с последующим формированием из отсчетов каждого окна информативного признака FD . С этой целью осуществляют переход от текущего дискретного отсчета пЭМГ x_t к отсчету y_t ,

получаемому путем сравнения текущего отсчета с порогом Θ и вычисляемому согласно выражению (2). На основе отсчетов (2) вычисляют информативный признак в окне TW по формуле (1).

Метод реализуется посредством последовательности программных модулей 1...26 (рис. 4).

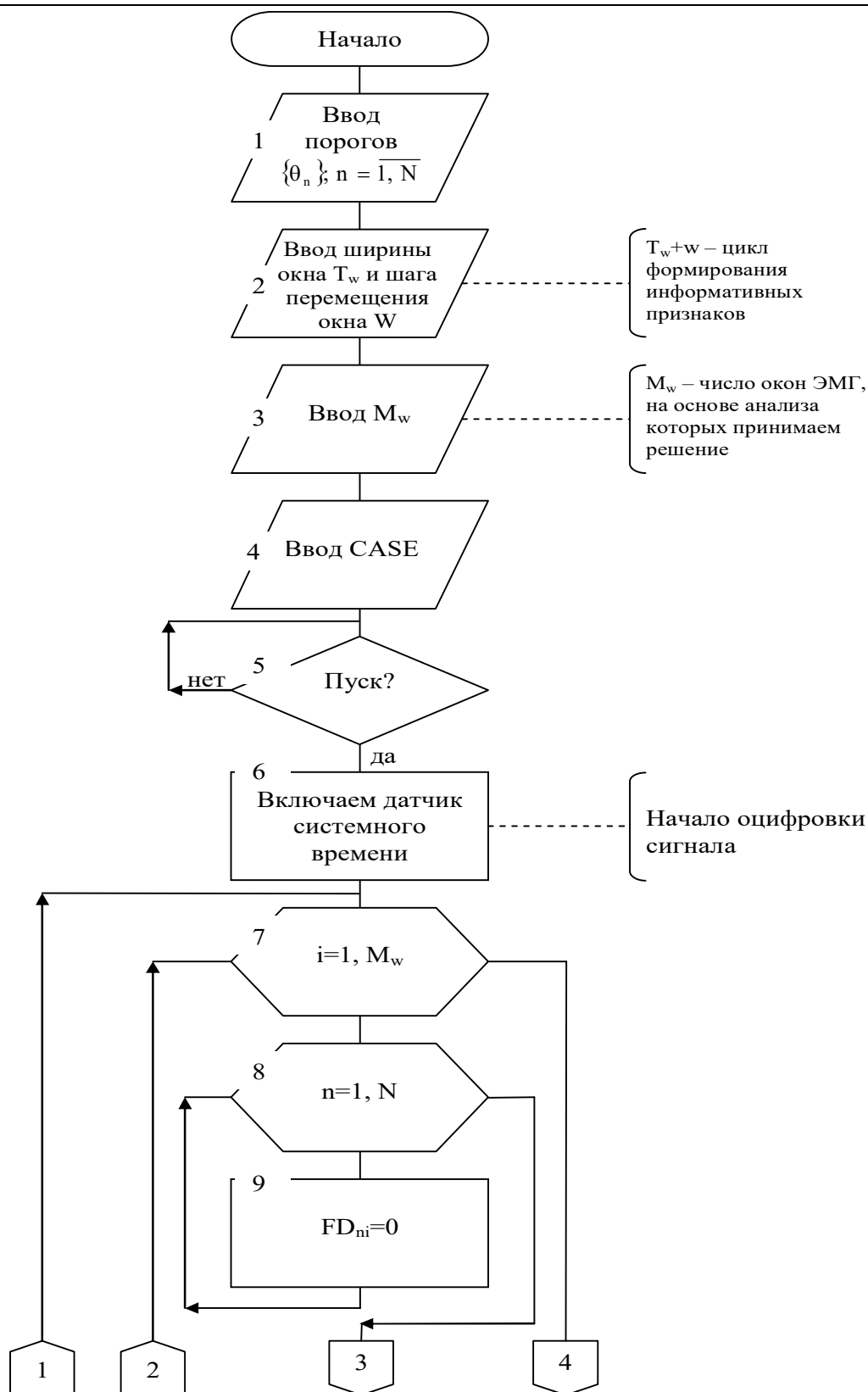


Рис. 4. Схема алгоритма реализации метода дешифрации электромиосигнала (см. также с. 58 и 59)

Fig. 4. Diagram of the algorithm for implementing the method for decoding the electromyosignal (see also page 58 and 59)

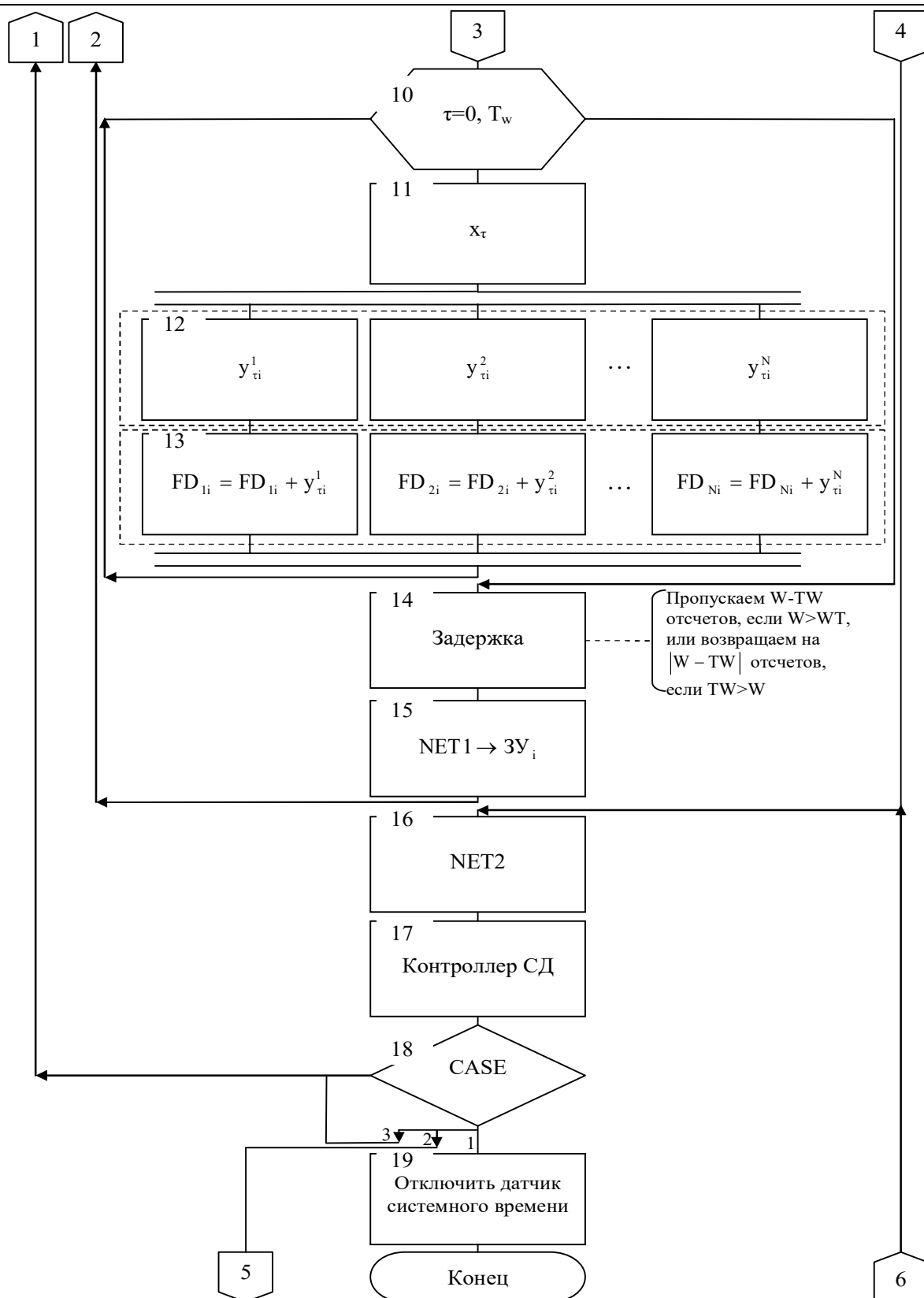


Рис. 4. Продолжение

Fig. 4. Continuation

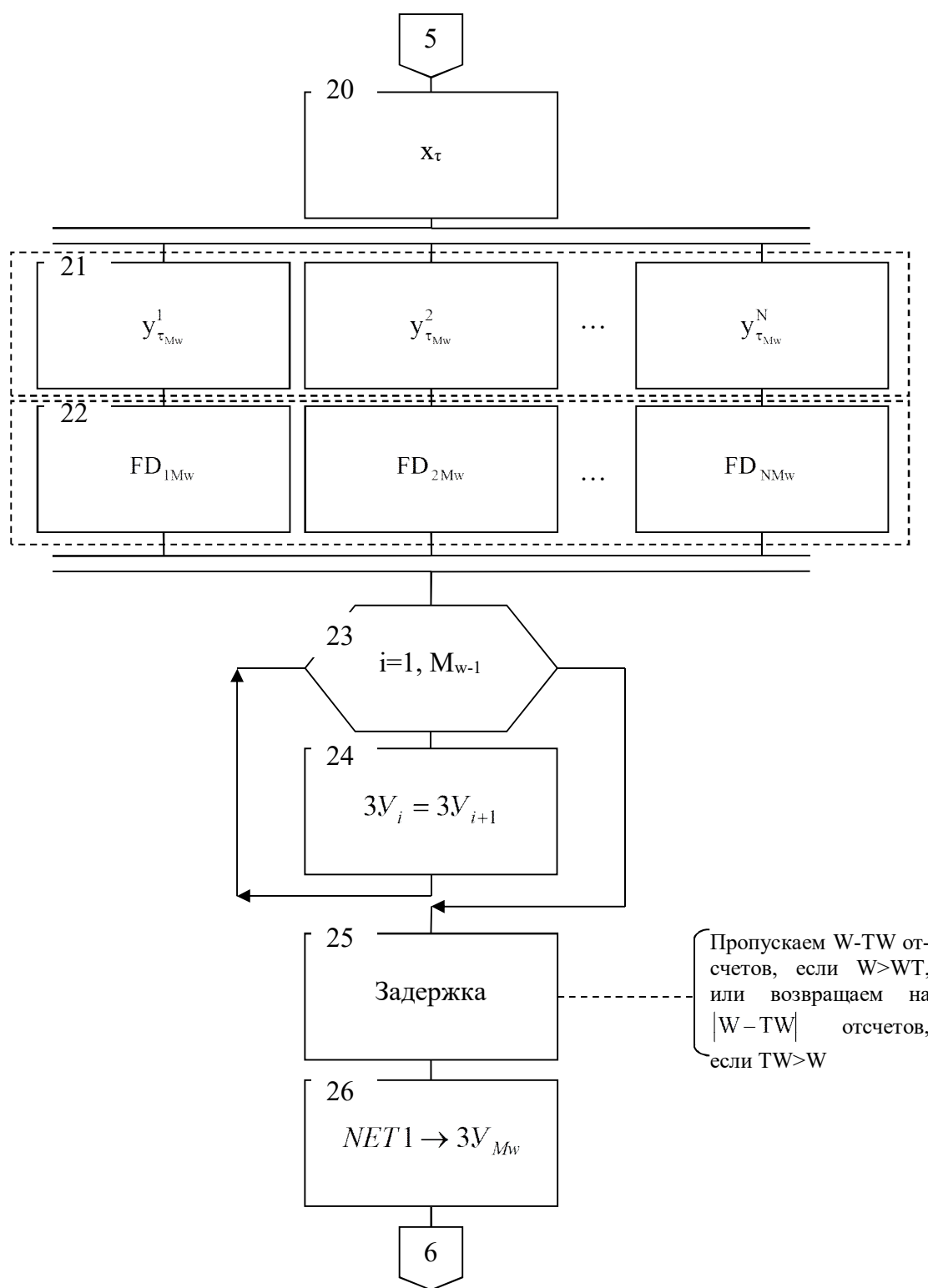


Рис. 4. Окончание

Fig. 4. Ending

На рисунке 5 показано, как из сигнала пЭМГ $x(t)$ (рис. 5, а) получается сигнал $y(t)$ (рис. 6, б) для одного порога Θ . На ширине окна можно использовать множество порогов Θ и, как следствие, получить множество информативных признаков FD .

Процедуру трансформации отсчетов сигнала пЭМГ, согласно уравнению (2), осуществляет блок компараторов 5 (см. рис. 3). В результате выполнения этой процедуры одному отсчету x_t ЭМС ставится в соответствие N отсчетов y_t . Эта процедура может осуществляться как на аппаратном, так и на программном уровне.

На схеме алгоритма (см. рис. 4) она представлена блоком 12 в виде параллельного вычисления (1), что соответствует аппаратному уровню реализации. В вычислителях блока вычислений 6 (см. рис. 3) реализуется процедура вычисления информативного признака (1). На схеме алгоритма (см. рис. 4) это блок 13.

Через мультиплексор 7 полученный N -мерный вектор информативных признаков поступает на вход первой нейронной сети $NET1$ после классификации, в которой соответствующее решение заносится в соответствующую ячейку памяти блока памяти 9 (см. рис.

3). После этого необходимо пропустить W отсчетов и выполнить аналогичную процедуру (цикл блок 7 на схеме алгоритма рис. 4). Число анализируемых окон MW , необходимых для принятия решений, вводится в блоке 3 (рис. 4). Если $W > TW$, то используются неперекрывающиеся окна. В противном случае используются окна с перекрытием.

Эти информативные признаки являются входами обучаемой сети $NET1$, которая используется в качестве дешифратора сигналов ЭМГ (блок 15 на рис. 4 и блок 8 на рис. 3).

Задавшись апертурой пЭМГ, на которой принимается решение о включении соответствующего серводвигателя, можем выделить на ней множество окон, а следовательно, множество выходов $NET1$. Так как выходы $NET1$ разнесены во времени, то для принятия решения по совокупности результатов этих выходов необходимо запоминающее устройство (блок 9 на рис. 3), в котором хранят эти результаты. После анализа соответствующего количества окон результаты этого анализа поступают на обучаемую нейронную сеть $NET2$ (блок 16 рисунок 4 и блок 10 на рис. 3), выходы которой подключены к контроллеру серводвигателей 11 (см. рис. 3).

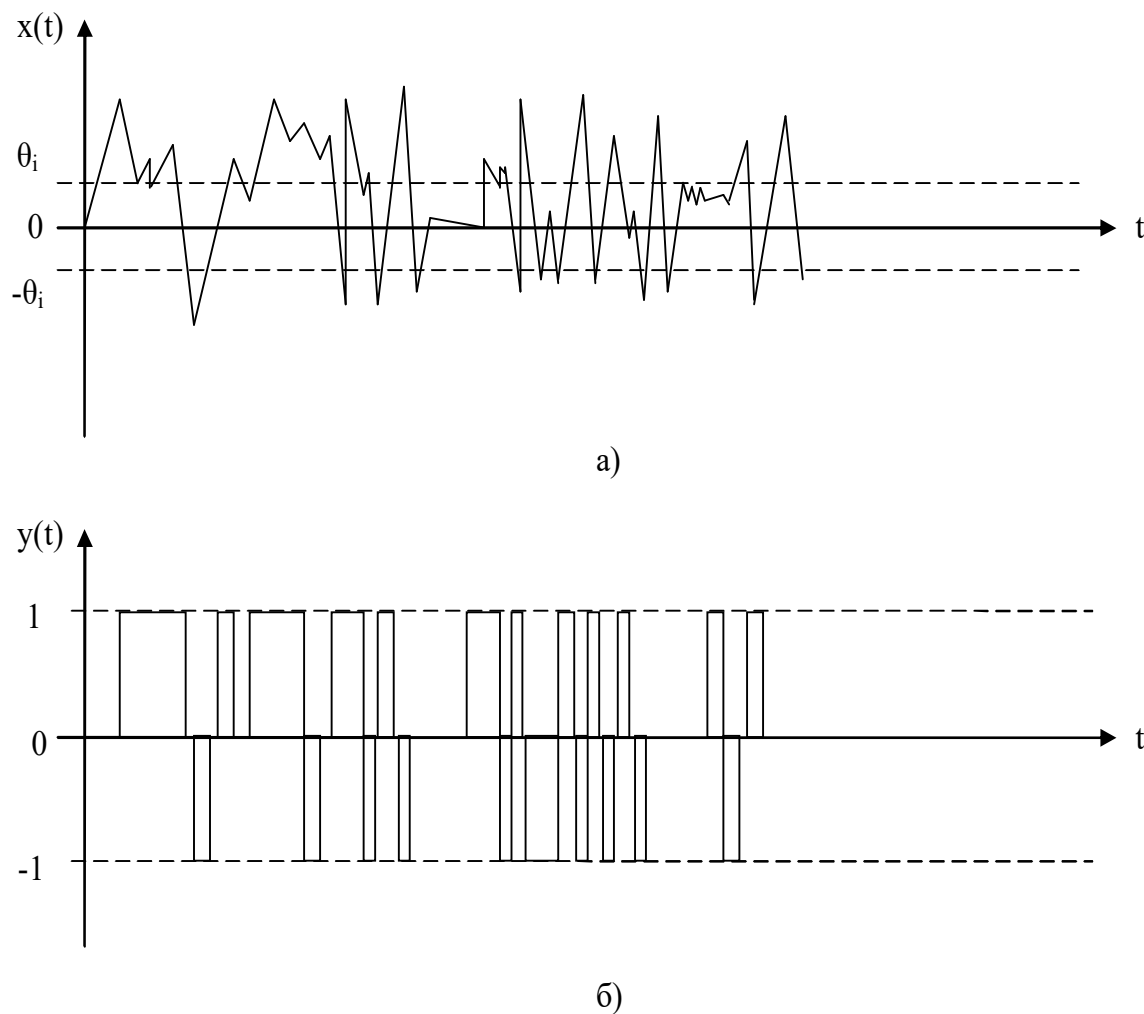


Рис. 5. Иллюстрация перехода от сигнала ЭМГ $x(t)$ (а) к сигналу $y(t)$ (б)

Fig. 5. Illustration of the transition from the EMG signal $x(t)$ (a) to the signal $y(t)$ (b)

Число окон анализа, т. е. входов $NET2$, зависит от времени дешифрации команды, зашифрованной в ЭМГ сигнале, и от минимального кванта информации, переносимого ЭМГ-сигналом. Согласно литературным источникам, временная апертура дешифрации ЭМГ-сигнала составляет 250 мс, а минимальный информационный квант, т. е. минимальный отрезок ЭМГ-сигнала, который переносит релевантную информацию, составляет $TW=25$ мс. Таким образом,

при использовании окон без перекрытия число окон, на основе анализа которых принимается решение, $MW=int(250/W)$, где W – шаг перемещения окна в мс. Если используются окна с перекрытием, то $MW=int((250-TW)/W)$. Процесс определения числа окон анализа иллюстрирует рисунок 6. На рисунке 6, а показан процесс формирования окон без перекрытия, а на рисунке 6, б – процесс формирования окон с перекрытием.

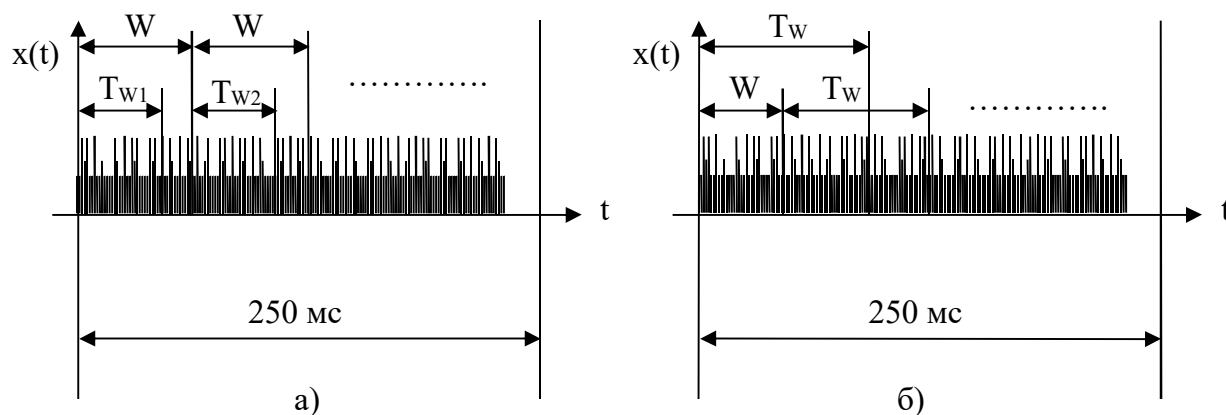


Рис. 6. Определение числа окон анализа: а – для окон без перекрытия; б – для перекрывающихся окон

Fig. 6. Determination of the number of analysis windows: а – for windows without overlapping; б – for overlapping windows

Синхронизатор 12 (см. рис. 3) синхронизирует работу классификатора таким образом, чтобы формировалась последовательность векторов информативных признаков, характеризующих временные окна, таким образом, чтобы на апертуре наблюдения пЭМГ, соответствующей MW окнам анализа, на входе $NET2$ сформировался вектор информативных признаков $\{NET1_j\}$, где $j = \overline{1, MW}$. Так как формирование этого вектора информативных признаков разнесено во времени, то на $NET2$ должен быть подан стробирующий сигнал, сигнализирующий о завершении формирования этого вектора.

Эпюры сигналов на выходе синхронизатора представлены на рисунке 7.

На рисунке 7, а показаны окна отсчетов сигнала $x(t)$ пЭМГ. В данном примере представлен случай с непересекающимися окнами. На рисунке 7, б показаны стробирующие сигналы, поступающие на мультиплексор и блок памяти. Эти сигналы переключают регистры адреса мультиплексора и блока памяти. На рисунке 7, в показан стробирующий сигнал, сигнализирующий о том, что на выходах $NET2$ появилась релевантная информация. Строб формируется после того, как будет сформирован вектор $\{NET1_j\}$ выходами $NET1$, и разрешает контроллеру серводвигателей 11 исполнять команды, поступающие с $NET2$.

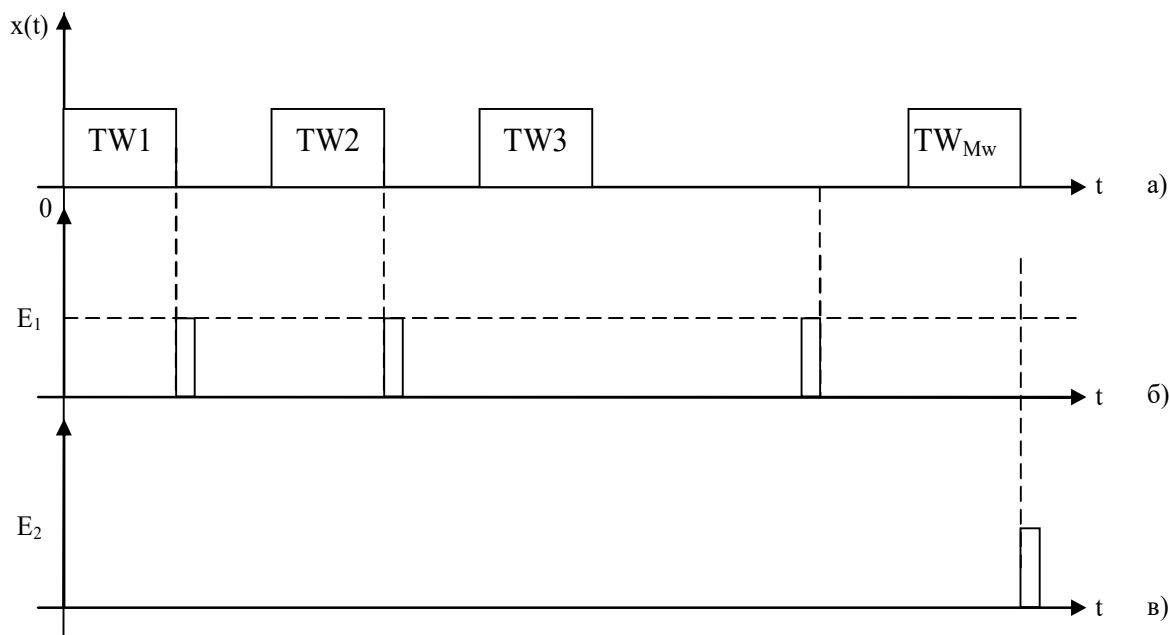


Рис. 7. Эпюры формирования управляющих импульсов на выходе синхронизатора

Fig. 7. Diagrams of the formation of control pulses at the output of the synchronizer

После включения соответствующего серводвигателя ЛПП может выбрать два варианта дальнейшей работы (блок 4 на рис. 4). Выбор этих вариантов осуществляется посредством оператора CASE в блоке 18. Если CASE равен 2, то осуществляется переход на блок 7, в котором осуществляется анализ следующих MW окон. Следовательно, следующая команда на серводвигатель может поступить только через $TW \times MW$ отсчетов. Это замедляет процесс принятия решений. Поэтому в алгоритме предусматривается ветвь 3, согласно которой при принятии решений у нейронной сети $NET2$ изменяется только вход, соответствующий первому результату анализа нейронной сети $NET1$. Остальные входы

$NET2$ смещаются на единицу, в результате чего последний отчет замещается первым отсчетом следующего окна, а первый отчет предшествующего окна замещается вторым отсчетом предшествующего окна. Эту процедуру реализуют блоки 23 и 24 алгоритма (см. рис. 4).

Результаты и их обсуждение

Для управления серводвигателями в процессе вертикализации используем пять каналов пЭМГ, которые считывают пЭМГ с большой ягодичной мышцы, двуглавой мышцы бедра, полуперепончатой мышцы, полусухожильной мышцы, большой приводящей мышцы. На рисунке 8 показана топология электродов пЭМГ на соответствующих анатомических структурах пациента.



Рис. 8. Топология электродов пЭМГ на соответствующих мышцах для управления вертикализацией

Fig. 8. Topology of EMG electrodes on the corresponding muscles to control verticalization

На рисунке 9 показана упрощенная кинематическая схема экзоскелета для режима вертикализации в биотехнической системе реабилитации постинсультных больных.

Для простоты расчетов полагаем, что $\varphi_1 = 90^\circ$ и не изменяется в процессе вертикализации (этот случай показан на рис. 9), тогда процесс вертикализации может быть осуществлен с помощью двух серводвигателей СД1 и СД2, управляющих углами φ_2 и φ_3 , соответственно.

Процесс вертикализации управляется посредством дешифрации пЭМГ в каналах, и скорость вертикализации зависит от интенсивности пЭМГ в каналах. При определенных сочетаниях интенсивностей пЭМГ в каналах серводвигатели могут остановиться в любой фазе вертикализации. В этом случае, чувствуя, что у него «не хватает сил встать», пациент захочет сесть. В этом случае возможна генерация соответствующих пЭМГ, которые могут быть использованы для реверса серводвигателей.

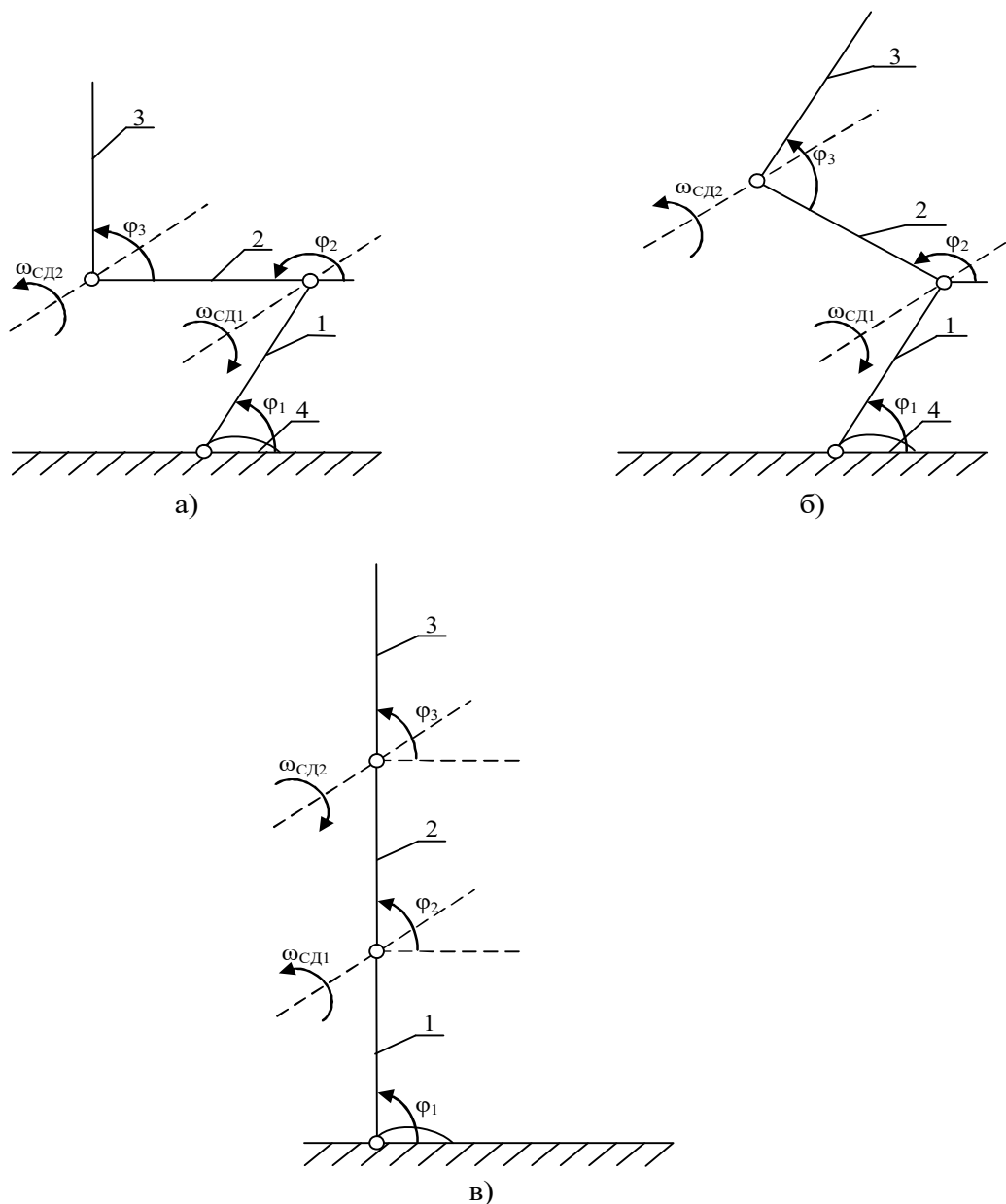


Рис. 9. Кинематическая схема экзоскелета: 1 – голень; 2 – бедро; 3 – позвоночник; 4 – стопа; а – начальное состояние вертикализации; б – промежуточное состояние вертикализации; в – конечное состояние вертикализации

Fig. 9. Kinematic diagram of the exoskeleton: 1 – lower leg; 2 – thigh; 3 – spine; 4 – foot; а – initial state of verticalization; б – intermediate state of verticalization; в – final state of verticalization

Для осуществления режима «сесть» используются каналы пЭМГ с подвздошно-поясничной мышцы. Таким образом, для вертикализатора в качестве дешифратора пЭМГ необходимо использовать как минимум шесть каналов

пЭМГ и еще одну нейросетевую структуру, используемую в качестве агрегатора дешифраторов каналов пЭМГ.

Структурная схема такого классификатора показана ниже (рис. 10).

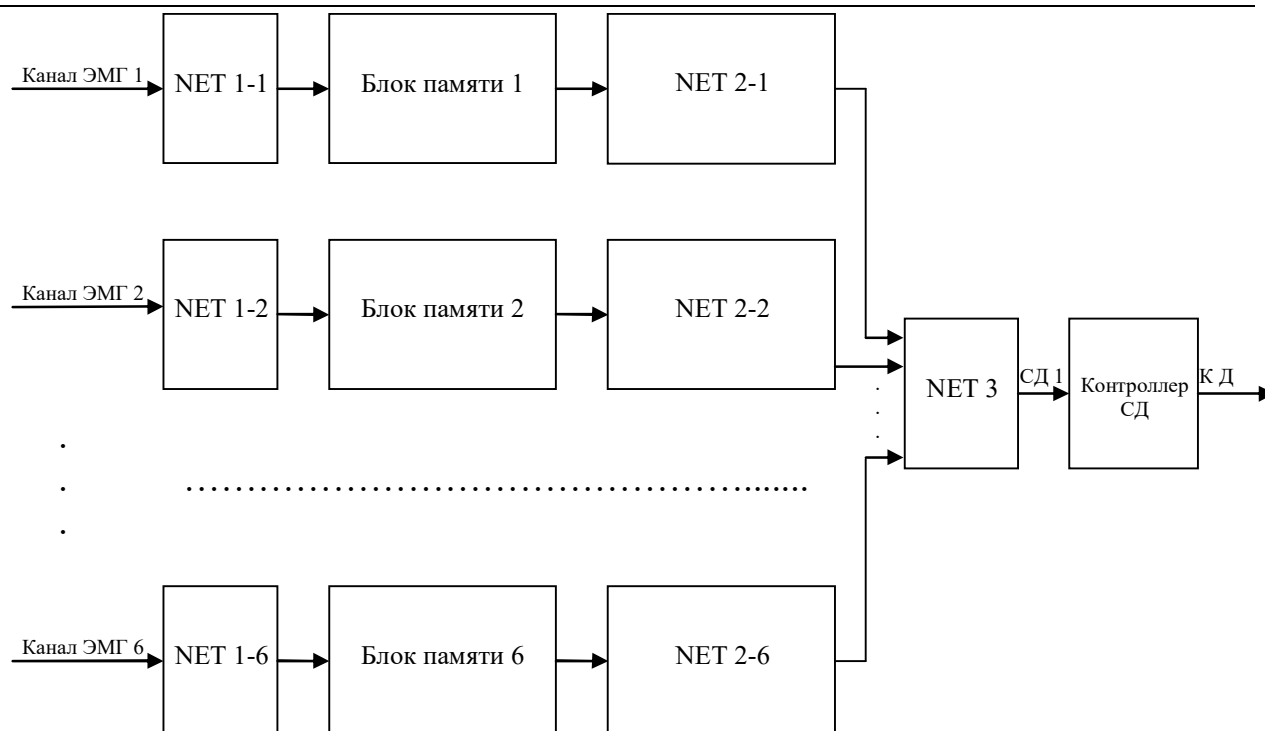


Рис. 10. Структурная схема классификатора пЭМГ при использовании дублирующих каналов

Fig. 10. Block diagram of classificatory EMG when using duplicate channels

Нейронная сеть *NET3* является нечеткой нейронной сетью. Ее выход вычисляется путем дефuzzификации шести

функций принадлежности, представленных на рисунке 11.

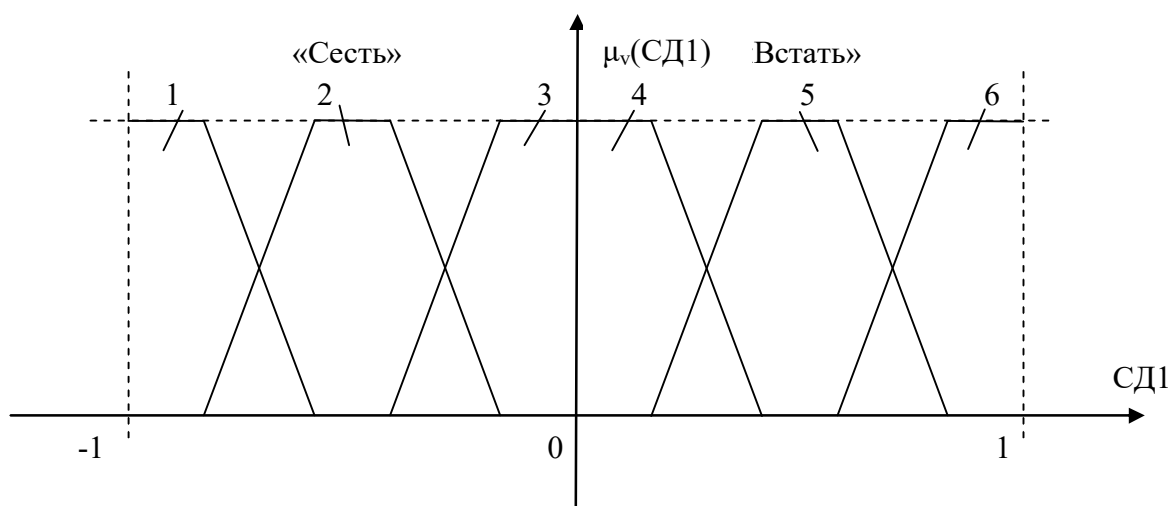


Рис. 11. Функция принадлежности для управления серводвигателем СД1: 1 – «сесть быстро»; 2 – «сесть в среднем темпе»; 3 – «сесть медленно»; 4 – «встать медленно»; 4 – «встать медленно»; 5 – «встать в среднем темпе»; 6 – «встать быстро»

Fig. 11. Membership function for controlling the SD1 servo motor: 1 – "sit down quickly"; 2 – "sit down at an average pace"; 3 – "sit down slowly"; 4 – "get up slowly"; 5 – "get up at an average pace"; 6 – "get up quickly"

Управление вторым серводвигателем осуществляется контроллером серводвигателей на основе модели движения экзоскелета в режиме «встать – сесть». Параметры модели адаптируются под физическое состояние пациента, что позволяет устранить основной недостаток известных реабилитирующих экзоскелетов.

Экспериментальные исследования эффективности реабилитации посредством биотехнической системы с модулем нечеткого управления

В общей сложности в экспериментальную группу было включено 23 пациента с подострым состоянием (<180 дней после обострения). Характеристики пациентов экспериментальной группы представлены в таблице 1. Экспериментальные исследования проводились в отделении медицинской реабилитации

клинического научно-медицинского центра «Авиценна» г. Курск с декабря 2019 г. по декабрь 2020 г. Пациенты были проверены сертифицированным физиотерапевтом, который имел опыт в использовании бионических устройств и который проверял потенциальных участников исследования на соответствие критериям.

В качестве контрольных использовались ретроспективные результаты реабилитации пациентов, проходивших тренинг в том же реабилитационном центре на том же оборудовании, но без использования ПО, осуществляющего адаптацию реабилитационного процесса к функциональному состоянию пациента посредством МНУ. Для формирования данных по контрольной группе использовалась такая же стратификация пациентов, как и в экспериментальной группе.

Таблица 1. Характеристики пациентов с подострым состоянием

Table 1. Characteristics of patients with a subacute condition

Характеристики	Хронические пациенты (n =23)
Средний возраст, лет	44±13
Пол:	
– мужской	12
– женский	11
Гемипарез:	
– левый	14
– правый	9
Этиология:	
– ишемия	13
– геморрагия	10
Среднее время от обострения, дней	66
Диапазон	25-180

Данное исследование являлось проспективным пилотным открытым нерандомизированным экспериментальным исследованием. Набранные пациенты прошли 12 сеансов (60 мин/сеанс 3 раза в неделю) реабилитационных тренировок в виртуальной реальности. В процессе реабилитации контролировались пЭМГ передней большеберцовой мышцы, камбаловидной мышцы, прямой мышцы бедра и подколенного сухожилия. Для каждого пациента были установлены разные параметры VR и собрана соответствующая этим параметрам пЭМГ. Выбор наилучшей конфигурации определялся на основе наилучшего времени активации мышц в соответствии с клинической практикой [7]. Таким образом, было определено индивидуализированное и адаптированное лечение.

Пациенты с подострыми состояниями прошли БТС-тренинг в сочетании с обычной физиотерапевтической тренировкой, тогда как хронические пациенты прошли только БТС-тренинг. Клиническая оценка, основанная на стандартах Международной классификации функционирования инвалидности и здоровья (МКФ) Всемирной организации здравоохранения [13], была проведена в трех точках общего периода БТС-тренинга: в начале периода обучения (t_0), после 6 занятий (t_1) и после 12 сеансов тренировочного периода (t_2).

Для оценки спастичности приводящих мышц бедра, разгибателей колена и

подошвенных бедренных мышц голеностопного сустава использовали шкалу Эшворта, а также индекс моторики (ИМ) для измерения силы в нижних конечностях [13]. В области деятельности МКФ тест управления туловищем (ТУТ) использовался для оценки управления туловищем не только во время поддержания положения сидя, но и в «динамических условиях». Шкала функциональной ходьбы (ШФХ) использовалась для оценки основных двигательных навыков, необходимых для функциональной мобильности. Для области деятельности МКФ также использовали тест 10-метровой ходьбы (10 мТХ) для оценки скорости ходьбы на короткое расстояние и тест на 6-минутную ходьбу (6 минТХ) в качестве субмаксимального теста аэробной способности / выносливости для оценки пройденного расстояния в течение 6 минут [13]. Для области применения стандартов МКФ использовалась шкала гандикапа ходьбы (ШГХ) для количественной оценки обычного уровня человека, способности ходить дома и в обществе.

В качестве статистического анализа был проведен тест Фридмана, полезный для непараметрических множественных сравнений, а затем был проведен апостериорный анализ с поправкой Вилкоксона и Бонферрони для значений p . Тест Вилкоксона, непараметрический тест, сравнивающий две парные группы, использовался для обнаружения значительных изменений между данными на

исходном уровне (t_0), после 6 сеансов (t_1) и в конце 12 сеансов периода тренинга (t_2). Статистический анализ проводился с помощью SPSS Statistics; статистическая значимость была установлена на уровне 0,05.

Двадцать три подострых пациентов были обследованы в t_1 и t_2 . В таблице 2 представлены медиана и диапазон значений шкал индекса Эшворта и моторики

для пациентов с подострой формой заболевания. Шкала Эшворта, измеренная на приводящих мышцах бедра ($P_{t_0-t_1} = 0,99$, $P_{t_0-t_2} = 0,99$), на мышцах-разгибателях колена ($P_{t_0-t_1} = 0,63$, $P_{t_0-t_2} = 0,99$) и на подошвенных мышцах бедра ($P_{t_0-t_1} = 0,25$, $P_{t_0-t_2} = 0,50$), статистических различий не выявила. Общий балл индекса мобильности показал значительные улучшения в t_0-t_1 ($P=0,002$), t_1-t_2 ($P = 0,0078$) и t_0-t_2 ($P = 0,001$).

Таблица 2. Клиническая шкала активности стандартов МКФ у пациентов с подострой формой заболевания

Table 2. Clinical scale of activity of ICF standards in patients with subacute form of the disease

Стандарты МКФ	Время		
	t_0	t_1	t_2
Шкала Эшворта			
Приводящая мышца бедра	0 (0-1)	0 (0-1)	0 (0-1)
Разгибающая мышца колена	0 (0-3)	0 (0-1)	0 (0-1)
Подошвенный сгибатель лодыжки	0 (0-3)	1,5 (0-3)	1 (0-3)
Индекс моторики			
Общий	33,5 (1-65)	43,5 (10-65)	59 (19-100)
Бедро	14 (0-25)	19 (9-25)	19 (9-33)
Колено	16,5 (0-25)	19 (0-25)	22 (9-33)
Лодыжка	4,5 (0-14)	9 (0-19)	14 (0-33)

Частичные оценки индекса моторики выявили значительные улучшения на уровне бедра в t_0-t_1 ($P = 0,0078$) и t_0-t_2 ($P=0,002$). Индекс моторики, оцененный на уровне колена, показал достоверное изменение в t_0-t_1 ($P=0,0313$) и t_0-t_2 ($P = 0,0078$). ИМ, оцениваемый на уровне голеностопного сустава, также

показал значительное улучшение в t_0-t_2 ($P = 0,0156$).

В таблице 3 представлены медианные значения ТУТ и ШФХ и средние значения 10 мТХ и 6 минТХ. ТУТ показал значительные изменения в t_1-t_2 ($P = 0,0078$) и t_0-t_2 ($P = 0,0039$). Также было значительное изменение в фактах в t_0-t_1 ($P = 0,001$) и t_0-t_2 ($P = 0,001$).

Таблица 3. Клиническая шкала для стандартов МКФ активности и участия для пациентов с подострой формой болезни**Table 3.** Clinical scale for ICF activity and participation standards for patients with subacute form of the disease

Стандарты МКФ	Время		
	t_0	t_1	t_2
Тест управления туловищем	61 (12-74)	61 (24-74)	61 (24-100)
Функциональная шкала передвижения	0,5 (0-3)	2,5 (0-4)	3 (0-4)
10мТХ, с	27,8±12,8	29,4±21,1	29,2±25,4
10мТХ, шаги	18,4±12,4	16,5±8,4	15,7±7,5
10мТХ, м/с	0,46±0,29	0,49±0,28	0,56±0,33
6 минТХ, м	157,6±77,6	192,1±103,7	205,1±113,2
Шкала функциональной ходьбы	1 (1-3)	1,5 (1-4)	2 (1-4)

В начале периода обучения 5 пациентов с подострой формой могли ходить и выполняли упражнения 10 мТХ и 6 минТХ. В t_1 четыре дополнительных пациента снова стали ходить, а в t_2 в общей сложности 17 пациентов смогли ходить. Для 10мТХ не было значительной разницы во времени ($P_{t_0-t_1} = 0,63$, $P_{t_0-t_2} = 0,46$) или в количестве шагов ($P_{t_0-t_1} = 0,81$, $P_{t_0-t_2} = 0,38$). Значительное улучшение скорости ходьбы было достигнуто в t_1-t_2 ($P = 0,0234$) и t_0-t_2 ($P = 0,0078$). 6 минТХ показали статистически значимое изменение в t_0-t_1 ($P = 0,0156$), t_1-t_2 ($P = 0,0195$) и t_0-t_2 ($P = 0,0039$). ШФХ (последняя строка табл. 3) значительно улучшился по сравнению с t_0-t_2 ($P = 0,0156$).

Шкала Эшворта не показала значимой разницы между анализируемыми состояниями; не наблюдалось никаких изменений в величине на уровне бедра и колена, тогда как увеличение значения наблюдалось в подошвенных мышцах

бедра ($t_0 = 0$, $t_2 = 1$). Использование тренинга с VR по реабилитации походки не увеличивало спастичность.

Общий и частичный баллы индекса моторики в диапазонах t_0-t_1 и t_1-t_2 показали положительное увеличение значения. Оценка ИМ на уровне колен и бедер подтвердила, что в конце периода тренировки (t_2) пациенты полностью восстановили полный активный диапазон движений против силы тяжести. В частности, медианное значение ИМ на уровне бедра составляло 14 в начале периода обучения (t_0) и достигало 19 в момент t_2 ; среднее значение ИМ на уровне колена было оценено как 16,5 в момент t_0 и достигло 22 в момент t_2 . Статистически значимое изменение также было выявлено на уровне голеностопного сустава с частичным, но неполным восстановлением активных движений (медианное значение $t_0 = 4,5$, $t_2 = 14$).

Статистические различия были обнаружены для ТУТ, ШФХ, скорости ходьбы 10 мТХ и выносливости при

ходьбе 6 минТХ. Никаких изменений в средних значениях ТУТ между t_0 , t_1 и t_2 не наблюдалось, даже при наблюдении изменения в распределении отдельных значений и в диапазоне измерений.

Средняя скорость при спонтанной ходьбе в 10 мТХ увеличилась с 0,46 м / с до тренировки с экзоскелетом до 0,56 м/с в конце тренировки. Эта разница до и после тренинга, составляющая 0,10 м/с, ниже, чем минимально клинически значимая разница (МКЗР) для пациентов с инсультом 0,16 м/с. Количество пациентов, способных ходить в момент t_0 , составляло 5, в t_1 4 дополнительных пациента восстановили способность ходить, а в t_2 12 из 23 пациентов смогли передвигаться. Анализ значений отдельных субъектов между тремя оценками показывает, что разница от t_0 до t_2 больше, чем МКЗР для 12 из 23 (50%) пациентов.

Аналогичные соображения можно сделать для расстояния, пройденного за 6 минут. Среднее расстояние увеличивается со 157,6 м в момент t_0 до 205,1 м в момент t_2 . Через 6 минут МКЗР установлен на 50 м, и 8 из 12 (67%) пациентов достигли разницы до и после операции > 50 м. В конце тренировочного периода наблюдалось улучшение ШГХ (с 1 в t_0 до 2 в t_2), что указывает на восстановление домашней мобильности.

Выводы

1. Разработан метод дешифрации электромиосигналов, заключающийся в получении по меньшей мере одного

ЭМГ-сигнала пациента посредством миоэлектрического устройства считывания; обработку по меньшей мере одного ЭМГ-сигнала пациента посредством пошаговой сегментации, ЭМГ-сигнала на пересекающиеся или на непересекающиеся окна; формировании для каждого сегмента, полученного на предыдущем шаге, набора признаков ЭМГ-сигнала (вектора информативных признаков); передаче набора признаков ЭМГ-сигнала каждого сегмента по каналу передачи данных на классификатор, осуществляющий управление контроллером серводвигателей, который выполнен в виде обучаемой нейронной сети; отличающийся тем, что формирование вектора информативных признаков для нейронной сети осуществляют посредством многоуровневого компаратора, число уровней которого определяется размерностью вектора информативных признаков, определяемых путем усреднения выходов компараторов в скользящем окне, а в классификаторе используется вторая нейронная сеть, предназначенная для обобщения данных, получаемых при классификации вектора информативных признаков текущего окна, число входов которой определяется числом окон ЭМГ, используемых при принятии решения о включении/выключении соответствующего серводвигателя.

2. Разработано устройство управления серводвигателями экзоскелета, содержащее последовательно соединен-

ные миоэлектродное устройство считывания, блок обработки пЭМГ, бортовой процессор, осуществляющий дешифрацию электромиосигналов посредством нейросетевого классификатора, и контроллер серводвигателей, отличающееся тем, что дешифратор электромиосигналов включает последовательно соединенные блок компараторов, блок вычисления информативных признаков, мультиплексор, первую нейронную сеть, блок памяти и вторую нейронную сеть, выходы которой предназначены для подключения к контроллеру серводвигателей, и синхронизатор, выходом подключенный к входам управления мультиплексора, блока памяти и контроллера серводвигателей. В устройство введены дополнительные каналы, каждый из которых является классификатором ЭМГ-сигнала, связанного с определенной мышцей или группой мышц, контролирующих движение одного и того же сустава конечностей, и третья нейронная сеть, входами подключенная к выходам канальных классификаторов, а выходом – к контроллеру серводвигателей.

3. Разработан классификатор электромиосигналов, отличающийся использованием множества дублирующих каналов ЭМГ-сигналов, связанных с мышцей или группами мышц, контролирующих движение одного и того же сустава конечностей, в результате чего на выходе классификатора каждого канала получаем число, соответствующее уверенности в команде на вращение серво-

двигателя экзоскелета, все выходы классификаторов каналов поступают на нечеткую нейронную сеть, дефuzziфикатор которой формирует управляющий сигнал на контроллер серводвигателя, в результате анализа которого контроллер определяет скорость и направление вращения. При этом по желанию ЛПР при классификации ЭМГ-сигнала на каждом шаге принятия решений данные с первой нейронной сети обновляются полностью, или обновляется только тот выход нейронной сети, который пришел первым, а все остальные компоненты вектора информативных признаков второй нейронной сети сдвигаются на один шаг.

4. В ходе работы написано программное приложение, способное управлять экзоскелетом при помощи анализа пЭМГ.

5. Сформирована экспериментальная группа для оценки эффективности БТС-тренинга подострых больных с паретичными нижними конечностями. Контрольная группа формировалась виртуально на основе статистического анализа ретроспективных стратифицированных результатов реабилитации постинсультных больных посредством биотехнической системы с робототехническим устройством без использования модуля нечеткого управления.

6. Исследование показало, что можно изменить показатели клинического исхода у пациентов с подострым переживанием инсульта после 12 сеансов БТС-тренинга. Биотехническая система с

нечетким управлением робототехническим устройством позволяет осуществлять индивидуальную стратегию реабилитации постинсультных больных (включая целенаправленную тренировку ходьбы). Крупные многоцентровые рандомизированные контролируемые

испытания, сравнивающие стандартную наземную тренировку в экзоскелете и тренинг с адаптацией системы управления под функциональное состояние пациента, необходимы для проверки результатов этого предварительного исследования.

Список литературы

1. Аль-Бареда А. Я. С., Брежнева А. Н., Томакова Р. А. Алгоритмы синтеза оптимального управления в биотехнических системах реабилитационного типа на основе технологий нейронных сетей // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2018. Т. 17, № 3. С. 750-754.
2. Биотехническая система с виртуальной реальностью в реабилитационных комплексах с искусственными обратными связями / А. А. Трифонов, Е. В. Петрунина, С. А. Филист, А. А. Кузьмин, В. В. Жилин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 4. С. 46–66.
3. Human-Machine Interface of Rehabilitation Exoskeletons with Redundant Electromyographic Channels / A. Trifonov, S. Filist, S. Degtyarev, V. Serebrovsky, O. Shatalova // Zavalishin's Readings: Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics ER(ZR) 2020. Ufa, 2020. P. 237-247. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5580-0_19.
4. Кодовые образы сигналов электроэнцефалограммы для управления робототехническими устройствами посредством интерфейса мозг-компьютер / С. А. Филист, Е. В. Петрунина, А. А. Трифонов, А. В. Серебровский // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Научный журнал. 2019. Т. 7, № 1. С. 67-79. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.24.1.025>.
5. Филист С. А., Шаталова О. В., Ефремов М. А. Гибридная нейронная сеть с макрослоями для медицинских приложений // Нейрокомпьютеры. Разработка и применение. 2014. № 6. С. 35-39.
6. Гибридные многоагентные классификаторы в биотехнических системах диагностики заболеваний и мониторинга лекарственных назначений / М. А. Ефремов, О. В. Шаталова, В. В. Федянин, А. Н. Шуткин // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2015. № 6. С. 42-47.
7. Двухуровневая нейросетевая модель дешифратора электромиосигнала в системе управления вертикализацией экзоскелета / А. А. Трифонов, С. А. Филист,

А. А. Кузьмин, В. В. Жилин, Е. В. Петрунина // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2020. № 4 (52). С. 99-111.

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

9. Neural network model in the exoskeleton verticalization control system / A. A. Trifonov, A. A. Kuzmin, S. A. Filist, E. V. Petrunina // Journal of Physics: Conference Series. 2020. N 1679. P. 032036. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/3/032036>.

10. Будко Р. Ю., Старченко И. Б. Создание классификатора мимических движений на основе анализа электромиограммы // Труды СПИИРАН. 2016. Вып. 46. С. 76-89.

11. Кассим К. Д. А., Филист С. А., Рыбочкин А. Ф. Компьютерные технологии обработки и анализа биомедицинских сигналов и данных: учебное пособие / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2016. 290 с.

12. Пат. 2635632 Российская Федерация, МПК А 61 F 2/72, А 61 F 2/68, А 61 F 2/62. Способ и система управления интеллектуальной бионической конечностью / Иवानюк Н. М., Каримов В. Р., Будко Р. Ю., Гронский П. В., Клейман С. М.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Бионик Натали». № 2016149199; заявл. 14.12.16; опубл. 14.11.17, Бюл. № 32. 30 с.: ил.

13. Wearable robotic exoskeleton for overground gait training in sub-acute and chronic hemiparetic stroke patients: preliminary results / F. Molteni [et al.] // European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine. 2017. Vol. 53, N 5. P. 676-684. <https://doi.org/10.23736/S1973-9087.17.04591-9>

References

1. Al'-Bareda A. Ya. S., Brezhneva A. N., Tomakova R. A. Algoritmy sinteza optimal'nogo upravleniya v biotekhnicheskikh sistemakh reabilitatsionnogo tipa na osnove tekhnologii neironnykh setei [Algorithms for the synthesis of optimal control in biotechnical systems of rehabilitation type based on neural network technologies]. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = Systems Analysis and Control in Biomedical Systems*, 2018, vol. 17, no. 3. pp. 750-754.

2. Trifonov A. A., Petrunina E. V., Filist S. A., Kuz'min A. A., Zhilin V. V. Biotekhnicheskaya sistema s virtual'noi real'nost'yu v reabilitatsionnykh kompleksakh s iskusstvennymi obratnymi svyazyami [Biotechnical system with virtual reality in rehabilitation complexes with artificial feedbacks]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika*.

Meditinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering, 2019, vol. 9, no. 4, pp. 46-66.

3. Trifonov A., Filist S., Degtyarev S., Serebrovsky V., Shatalova O. Human-Machine Interface of Rehabilitation Exoskeletons with Redundant Electromyographic Channels. Zavalishin's Readings. Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics. Ufa, 2020, pp. 237-247. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5580-0_19

4. Filist S. A., Petrunina E. V., Trifonov A. A., Serebrovskii A. V. Kodovye obrazy signalov ehlektroehtsefalogrammy dlya upravleniya robototekhnicheskimi ustroystvami posredstvom interfeisa mozg-komp'yuter [Code images of electroencephalogram signals for controlling robotic devices via the brain-computer interface]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. Nauchnyi zhurnal = Modeling, Optimization and Information Technology. Scientific Journal*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 67-79. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.24.1.025>

5. Filist S. A., Shatalova O. V., Efremov M. A. Gibridnaya neironnaya set' s makrosloyami dlya meditsinskikh prilozhenii [Hybrid neural network with macro layers for medical applications]. *Neirokomp'yutery. Razrabotka i primenenie = Neurocomputers: Development, Application*, 2014, no. 6, pp. 35-39.

6. Efremov M. A., Shatalova O. V., Fedyanin V. V., Shutkin A. N. Gibridnye mnogoagentnye klassifikatory v biotekhnicheskikh sistemakh diagnostiki zabolevanii i monitoringa lekarstvennykh naznachenii [Hybrid multi-agent classifiers in biotechnical systems for the diagnosis of diseases and monitoring of medicinal prescriptions]. *Neirokomp'yutery: razrabotka, primenenie = Neurocomputers: Development, Application*, 2015, no. 6, pp. 42-47.

7. Trifonov A. A., Filist S. A., Kuz'min A. A., Zhilin V. V., Petrunina E. V. Dvukhurovnevaya neirosetevaya model' deshifratora ehlektromiosignala v sisteme upravleniya vertikalizatsiei ehkzoskeleta [A two-level neural network model of an electromyosignal decoder in an exoskeleton verticalization control system]. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2020, no. 4 (52), pp. 99-111.

8. Petrova T. V., Filist S. A., Degtyarev S. V., Kiselev A. V., Shatalova O. V. Prediktory sinkhronnosti sistemnykh ritmov zhivyykh sistem dlya klassifikatorov ikh funktsional'nykh sostoyanii [Predictors of synchronicity of system rhythms of living systems for classifiers of their functional states]. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = Systems Analysis and Control in Biomedical Systems*, 2018, vol. 17, no. 3, pp. 693-700.

9. Trifonov A. A., Kuzmin A. A., Filist S. A., Petrunina E. V. Neural network model in the exoskeleton verticalization control system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, no. 1679, p. 032036. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/3/032036>

10. Budko R. Yu., Starchenko I. B. Sozdanie klassifikatora mimicheskikh dvizhenii na osnove analiza elektromiogrammy [Creating a classifier of facial movements based on the analysis of an electromyogram]. *Trudy SPIIRAN = Proceedings SPIIRAS*, 2016, is. 46, pp. 76-89.

11. Kassim K. D. A., Filist S. A., Rybochkin A. F. Komp'yuternye tekhnologii obrabotki i analiza biomeditsinskikh signalov i dannykh [Computer technologies for processing and analyzing biomedical signals and data]. Kursk, Southwest State University Publ., 2016. 290 p.

12. Ivanyuk N. M., Karimov V. R., Budko R. Yu., Gronsii P. V., Kleiman S. M. Sposob i sistema upravleniya intellektual'noi bionicheskoi konechnost'yu [Method and system of intelligent bionic limb control]. Patent RF, no. 2635632, 2017.

13. Molteni F., eds. Wearable robotic exoskeleton for overground gait training in sub-acute and chronic hemiparetic stroke patients: preliminary results. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, 2017, vol. 53, no. 5, pp. 676-684. <https://doi.org/10.23736/S1973-9087.17.04591-9>

Информация об авторах / Information about the Authors

Трифонов Андрей Андреевич, аспирант,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: voldraf@mail.ru

Andrey A. Trifonov, Post-Graduate Student,
Southwest State University, Kursk, Russian
Federation,
e-mail: voldraf@mail.ru

Филист Сергей Алексеевич, доктор
технических наук, профессор кафедры
биомедицинской инженерии, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: sfilist@gmail.com

Sergey A. Filist, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor of the Department of Biomedical
Engineering, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: sfilist@gmail.com

Петрунина Елена Валерьевна, кандидат
технических наук, доцент, Московский
государственный гуманитарно-экономический
университет, г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: petrunina@mggeu.ru

Elena V. Petrunina, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor, Moscow
State University for the Humanities
and Economics, Moscow, Russian Federation,
e-mail: petrunina@mggeu.ru

Кузьмин Александр Алексеевич, доктор технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ku3bmin@gmail.com

Alexander A. Kuzmin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ku3bmin@gmail.com

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

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

Крикунова Евгения Владимировна, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kev7002@yandex.ru

Evgeniya V. Krikunova, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kev7002@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 004, 621.3

Метод распознавания уровня качества обслуживания пакетного трафика сетевыми маршрутами в условиях импликантного наблюдения

А. Е. Севрюков¹ ✉, Д. А. Стребков²

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

² АО «Электроагрегат»,
ул. Агрегатная 2-я 5А, г. Курск 305022, Российская Федерация

✉ e-mail: alsevryukov@yandex.ru

Резюме

Целью исследования является разработка метода распознавания класса (уровня) качества обслуживания в сетевых маршрутах в условиях быстрых изменений пакетного трафика и импликантного (частичного) наблюдения за уровнем качества обслуживания в звеньях сети пакетной связи.

Методы. Для своевременной оценки уровня качества обслуживания и снижения загрузки сетевых маршрутов тестовым трафиком предлагается контролировать уровень качества обслуживания только в части звеньев сети пакетной связи, сетевого маршрута на основе программно-аппаратных сенсоров, применяющих ICMP эхо-запросы, IP SLA трекеры, TWAMP и др. Для распознавания качества обслуживания в вероятных сетевых маршрутах на этапе подготовки исходных данных: определяются важные звенья из состава сетевых маршрутов на основании рассчитанных с применением статистики коэффициентов парной корреляции между значениями одинаковых показателей качества для разных звеньев и сетевых маршрутов, в экспертных суждениях о весомости каждого показателя качества обслуживания; пакетный трафик корпоративной сети разделяется на классы с разными уровнями качества обслуживания в пространстве показателей качества QoS; строятся нечеткие модели для разных классов (уровней) качества обслуживания для вероятных сетевых маршрутов и звеньев сети, базирующиеся на экспертных суждениях и методе анализа иерархий, функциях принадлежности градаций признаков (моделей уровня качества обслуживания в важных звеньях сети, значений показателей качества обслуживания в звеньях сети) к описываемому (моделируемому) объекту.

В рамках разработанного метода последовательно распознаются модели классов качества обслуживания в важных звеньях сети на основании наблюдаемых значений показателей качества обслуживания в звеньях сети, а затем распознаются модели класса качества обслуживания в сетевом маршруте на основании распознанных моделей уровня качества обслуживания в важных звеньях сети.

Результаты. В рамках исследовательского эксперимента произведено распознавание уровня качества обслуживания в сетевом маршруте в гипотетических ситуациях в условиях принятых ограничений на изменение значений наблюдаемых показателей качества обслуживания в звеньях сети.

При этом в качестве базиса для построения нечетких моделей разных классов качества обслуживания пакетного трафика и для имитации наблюдаемых значений показателей качества обслуживания в звеньях сети авторами применены статистические модели, базирующиеся на теоретическом расчете и известной статистике для близких к эксперименту условий. Доказана целесообразность применения разработанного метода для распознавания уровня качества обслуживания в сетевом маршруте в условиях частичного наблюдения и изменениях пакетного трафика в условиях принятых ограничений.

© Севрюков А. Е., Стребков Д. А., 2021

Заключение. Применение предложенного метода распознавания уровня качества обслуживания сетевыми маршрутами пакетного трафика в условиях частичного наблюдения позволит повысить оперативность и достоверность мониторинга качества обслуживания в сетевых маршрутах, снизить загрузку линий передачи в автономных сетях пакетной связи, больших корпоративных сетях.

Ключевые слова: маршрутизация; показатели качества передачи (обслуживания); сенсорная сеть; функция принадлежности; мультисервисная сеть связи.

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

Для цитирования: Севрюков А. Е., Стребков Д. А. Метод распознавания уровня качества обслуживания пакетного трафика сетевыми маршрутами в условиях имплицитного наблюдения // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 3. С. 78–101.

Поступила в редакцию 20.07.2021

Подписана в печать 18.08.2021

Опубликована 30.09.2021

A Method for Recognizing the Level of Service Quality by Network Routes of Packet Traffic in the Conditions of Implicit Surveillance

Alexander E. Sevryukov¹ ✉, Dmitry A. Strebkov²

¹ Southwest State University

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

² JSC "Electroagregat"

5A 2nd Aggregatnaya str., Kursk 305022, Russian Federation

✉ e-mail: alsevryukov@yandex.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop a method for recognizing the class (level) of quality of service in network routes under conditions of rapid changes in packet traffic and implicit (partial) monitoring of the level of quality of service in the links of the packet communication network.

Methods. In order to timely assess the level of service quality and reduce the load of network routes with test traffic, it is proposed to monitor the level of service quality only in part of the links of the packet communication network, the network route based on software and hardware sensors using ICMP echo requests, IP SLA trackers, TWAMP, etc. To recognize the quality of service in probable network routes at the stage of preparing initial data: important links from the network routes are determined based on the coefficients of paired correlation calculated using statistics between the values of the same quality indicators for different links and network routes, expert judgments about the weight of each service quality indicator; the packet traffic of the corporate network is divided into classes with different levels of service quality in the space of QoS quality indicators; fuzzy models are constructed for different classes (levels) of service quality for probable network routes and network links, based on expert judgments and the method of analyzing hierarchies, the functions of belonging gradations of features (models of the level of service quality in important network links, values of service quality indicators in network links) to the described (modeled) object.

Within the framework of the developed method, models of service quality classes in important network links are consistently recognized based on the observed values of service quality indicators in the network links, and then models

of the service quality class in the network route are recognized based on the recognized models of the service quality level in important network links.

Results. As part of the research experiment, the recognition of the level of service quality in the network route was performed in hypothetical situations under the conditions of accepted restrictions on changing the values of the observed indicators of service quality in the network links. At the same time, as a basis for constructing fuzzy models of different classes of service quality and for simulating the observed values of service quality indicators in the network links, the authors used statistical models based on theoretical calculation and known statistics for conditions close to the experiment.

The expediency of using the developed method for recognizing the level of service quality in a network route under conditions of partial monitoring and changes in packet traffic under the conditions of accepted restrictions is proved.

Conclusion. The application of the proposed method for recognizing the level of service quality by packet traffic network routes in conditions of partial monitoring will increase the efficiency and reliability of monitoring the quality of service in network routes, reduce the load of transmission lines in autonomous packet communication networks, large corporate networks.

Keywords: routing; transmission (service) quality indicators; sensor network; membership function; multiservice communication network.

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

For citation: Sevryukov A. E., Strebkov D. A. A method for recognizing the level of service quality by network routes of packet traffic in the conditions of implicit surveillance. *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*. 2021; 11(3): 78–101. (In Russ.)

Received 20.07.2021

Accepted 18.08.2021

Published 30.09.2021

Введение

Существующие методы статической и динамической маршрутизации позволяют управлять маршрутами передачи трафика в зависимости от результатов мониторинга и статистического прогнозирования показателей качества обслуживания пакетного трафика на вероятных сетевых маршрутах, линиях передачи сети связи непосредственно на оборудовании передачи трафика и управления [1; 2].

Применение существующих методик мониторинга и статистического прогнозирования показателей качества обслуживания пакетного трафика (ПТ) и соответствующие им сетевые протоколы (в частности, RIP, OSPF, IGRP/EIGRP и

IS-IS, ICMP эхо-запросы, IP SLA трекеры, TWAMP) в современных больших корпоративных сетях приводит к значительному возрастанию загрузки линий передачи, маршрутов сети пакетной связи тестовым трафиком, увеличению задержки при получении текущих контролируемых сетевых параметров [1; 3]. Кроме того, существующие методы мониторинга и статистического прогнозирования показателей качества обслуживания при быстрых и в больших масштабах изменениях сетевых параметров узлов и звеньев сети связи, обусловленных непредсказуемым (на интервале прогнозирования) «всплеском» нагрузки [4], приводят к снижению достоверности и актуальности информации о показателях

качества обслуживания в линиях передачи, на вероятных маршрутах передачи ПТ.

Для своевременной оценки устройствами управления (в частности, маршрутизаторами) показателей качества обслуживания пакетного трафика (КОПТ) на вероятных сетевых маршрутах, а также для снижения загрузки линий передачи, сетевых маршрутов тестовым трафиком целесообразно применить сенсорную сеть для частичного наблюдения за состоянием элементов сети связи (в частности, линий передачи, узлов коммутации) [3; 5]. При этом элементы сенсорной сети развертываются для контроля показателей качества обслуживания ПТ в важных звеньях сети связи с применением сетевых протоколов, к которым относятся: ICMP эхо-запросы, IP SLA трекеры, TWAMP [3].

В общем случае звено сети пакетной связи включает сетевое устройство (маршрутизатор), выполняющее обработку пакета (анализ заголовка, процесс выбора маршрута и др. операции), и линию связи в направлении передачи пакета между сетевыми устройствами [3; 6; 7]. Под важным звеном сети связи для оценки показателей КОПТ следует понимать звенья, для которых измеряемые показатели качества передачи имеют наибольший коэффициент корреляции с показателями КОПТ в сетевых маршрутах, в состав которых входят рассматриваемые звенья сети связи [8].

В связи с вышесказанным разработка метода распознавания класса (уровня) КОПТ в сетевых маршрутах мультисервисных сетей операторов связи, больших корпоративных сетей связи в условиях частичного наблюдения сетью сетевых сенсоров за состоянием, уровнем качества обслуживания в звеньях сети связи при быстрых изменениях ПТ является актуальной задачей.

Материалы и методы

В предлагаемом методе распознавания класса (уровня) качества обслуживания ПТ на вероятных сетевых маршрутах в условиях быстрых изменений ПТ и частичного наблюдения сетью сетевых сенсоров за важными звеньями сети пакетной связи применяются процедура последовательного распознавания класса качества обслуживания в звеньях сети связи и в вероятных маршрутах передачи ПТ, нечеткие модели для разных классов КОПТ в звеньях сети и сетевых маршрутах, стандартные протоколы для измерения показателей КОПТ, корреляционный анализ, функции принадлежности [9], метод анализа иерархий (МАИ) [10].

Нечеткая модель объекта исследования (в частности, уровня качества обслуживания в элементе сети связи) строится на основании нечетких суждений экспертов в условиях отсутствия полных статических данных о признаках моделируемого объекта. Применение нечетких моделей для описания уровня

(класса) качества обслуживания ПТ обусловлено отсутствием полной информации о взаимосвязи значений показателей КОПТ в элементах сети связи с уровнем качества обслуживания в звеньях сети и в сетевых маршрутах при разных условиях наблюдения. При этом условия наблюдения отличаются временем суток, разной активностью групп пользователей ресурсов корпоративной сети, автономной сети оператора связи, загрузкой линий связи, разными задержками при передаче измеренных значений показателей КОПТ с сетевых сенсоров (агентов) на устройство управления (сервер управления, маршрутизатор) и т. п.

В рамках разработки предлагаемого метода приняты следующие допущения и ограничения:

1. Элементы создаваемой сенсорной сети могут получать информацию, хранящуюся в маршрутизаторах, производить измерения и оценку показателей качества сетевого соединения (качества обслуживания) на основании IP SLA трекеров, ICMP эхо-запросов, IP SLA трекеров, TWAMP и др.

2. Применяемый алгоритм планирования очередей передачи данных и характеристики сетевых устройств (в частности, размер буферной памяти маршрутизаторов) позволяют обеспечить минимальные потери пакетного трафика, которые не оказывает существенного влияния на снижение значения вероятности потерь в звене сети пакетной связи [6; 11].

Процедура последовательного распознавания класса качества обслуживания в вероятных маршрутах передачи ПТ включает следующие этапы:

1. Этап подготовки исходных данных, на котором:

- определяются важные звенья сети для распознавания качества обслуживания на вероятных сетевых маршрутах;

- производится разделение пакетного трафика корпоративной компьютерной сети (ККС) на классы на основании значений показателей качества QoS, определенные в Y.1540 и Y.1541, стоимости маршрута, узла назначения и др. [3];

- устанавливается соответствие между классами пакетного трафика и требуемыми для передачи ПТ уровнями (классами) качества обслуживания $T_{\text{кач}}(z)$ в вероятных сетевых маршрутах;

- строятся нечеткие модели разных классов (уровней) качества обслуживания для вероятных сетевых маршрутов в пространстве моделей качества обслуживания в важных звеньях сети;

- строятся нечеткие модели разных классов (уровней) качества обслуживания для важных звеньев сети из состава вероятных сетевых маршрутов в пространстве наблюдаемых сетевыми сенсорами (агентами) показателей качества обслуживания.

2. Этап распознавания класса КОПТ в важных звеньях сети связи.

На втором этапе анализируются значения функций принадлежности нечетких моделей распознаваемого класса КОПТ в звене сети связи в пространстве наблюдаемых сетевыми сенсорами значений показателей КОПТ.

В качестве распознанной модели класса КОПТ для звена сети связи из множества альтернативных моделей классов КОПТ выбирается модель класса качества обслуживания, имеющая наибольшее значение функции принадлежности в условиях наблюдаемого сетевым сенсором множества значений показателей качества обслуживания.

3. Этап распознавания класса качества обслуживания в вероятных маршрутах передачи ПТ.

В качестве распознанной модели класса КОПТ для вероятного (k -го) сетевого маршрута из множества альтернативных моделей классов КОПТ выбирается модель класса качества обслуживания, имеющая наибольшее значение функции принадлежности в условиях распознанного множества моделей классов качества обслуживания для важных звеньев сети из состава (k -го) сетевого маршрута.

В качестве основных особенностей предлагаемого метода распознавания класса КОПТ вероятными сетевыми маршрутами следует выделить:

1. Определение важных звеньев для распознавания качества обслуживания в

вероятных сетевых маршрутах производится на основании корреляционного анализа собранной системой мониторинга статистической информации [3; 8; 12].

Отметим, что основными элементами системы мониторинга для сбора статистических данных [3; 5] о значениях показателей КОПТ в звеньях и в сетевых маршрутах ККС, опорной сети оператора связи являются: развернутая на элементах ККС сеть сетевых сенсоров, модуль формирования отчетов для принятия управленческих решений, модуль управления и сбора информации (в частности, на основании протокола SNMP), архив с хранящейся статистической информацией и консоль управления. Для сбора сетевых параметров сетевыми (программными) сенсорами (агентами) могут применяться ICMP эхо-запросы, IP SLA трекеры, TWAMP.

На основании собранной статистики о состоянии, значениях показателей КОПТ в звеньях сети и в сетевых маршрутах определяется уровень корреляции, коэффициент парной корреляции между значениями одинаковых показателей качества для разных звеньев и сетевых маршрутов, в состав которых входят анализируемые звенья сети связи [8].

На основании данных о корреляции между значениями одинаковых показателей качества обслуживания для звеньев сети связи и для вероятных сетевых маршрутов, в состав которых входят эти

звенья сети, определяются важные звенья сети. В качестве важного звена сети выбирают звено, имеющее максимальное значение интегрального коэффициента корреляции $r(X_{e,k}, X_k)$ в пространстве наблюдаемых показателей качества обслуживания.

Значение интегрального коэффициента корреляции $r(X_{e,k}, X_k)$ между значениями показателей качества обслуживания e -го звена сети из состава k -го вероятного сетевого маршрута и k -го вероятного сетевого маршрута передачи ПТ определяется на основании следующего выражения:

$$r(X_{e,k}, X_k) = w_{\beta=1} \cdot r(x_{\beta=1,e,k}, x_{\beta=1,k}) + w_{\beta=2} \cdot r(x_{\beta=2,e,k}, x_{\beta=2,k}) + \dots \dots + w_{\beta} \cdot r(x_{\beta,e,k}, x_{\beta,k}) + \dots \quad (1)$$

где $r(x_{\beta,e,k}, x_{\beta,k})$ – коэффициент парной корреляции между значениями β -го показателя КОПТ в e -м звене сети и значениями β -го показателя КОПТ в k -м вероятном сетевом маршруте [7]; $x_{\beta,e,k}$ – β -й показатель КОПТ в e -м звене сети связи; $x_{\beta,k}$ – β -й показатель КОПТ в k -м сетевом маршруте; w_{β} – важность (весомость) β -го показателя КОПТ в звене сети связи при оценке уровня качества обслуживания.

Следует отметить, что для определения коэффициентов парной корреляции $r(x_{\beta,e,k}, x_{\beta,k})$ требуется значительный объемов статистических данных о значениях показателей КОПТ в

элементах сети, что затрудняет определение важных звеньев сети.

Вариант частичного наблюдения за вероятными сетевыми маршрутами путем развертывания программных сенсоров (агентов) для контроля важных элементов мультисервисной сети i -го оператора связи представлен ниже (рис. 1).

2. Для разделения пакетного трафика автономной сети пакетной связи (в частности, ККС) на классы применяется следующая модель z -го класса пакетного трафика:

$$X_z = \left\langle \Delta x_{\alpha(z),\beta=1}; \Delta x_{\alpha(z),\beta=2}; \Delta x_{\alpha(z),\beta=3}; \Delta x_{\alpha(z),\beta=4}; \Delta x_{\alpha(z),\beta=5}; \Delta x_{\alpha(z),\beta=6} \right\rangle, \quad (2)$$

где $\Delta x_{\alpha(z),\beta}$ – $\alpha(z)$ -е значение (либо диапазон значений) β -го показателя качества (x_{β}), в наибольшей степени соответствующее требованиям к z -му классу ПТ.

В качестве показателей для построения модели z -го класса применяются следующие ($P\{z\} = X_{\beta}$) [3]:

- задержка (время, необходимое для перемещения пакета от источника к получателю $x_{\beta=1}$);
- джиттер ($x_{\beta=2}$);
- процент потери пакетов ($x_{\beta=3}$);
- пропускная способность (скорость передачи данных по сегменту сети, $x_{\beta=4}$);
- узел назначения ($x_{\beta=5}$);
- стоимость (стоимость маршрута ($x_{\beta=6}$)).

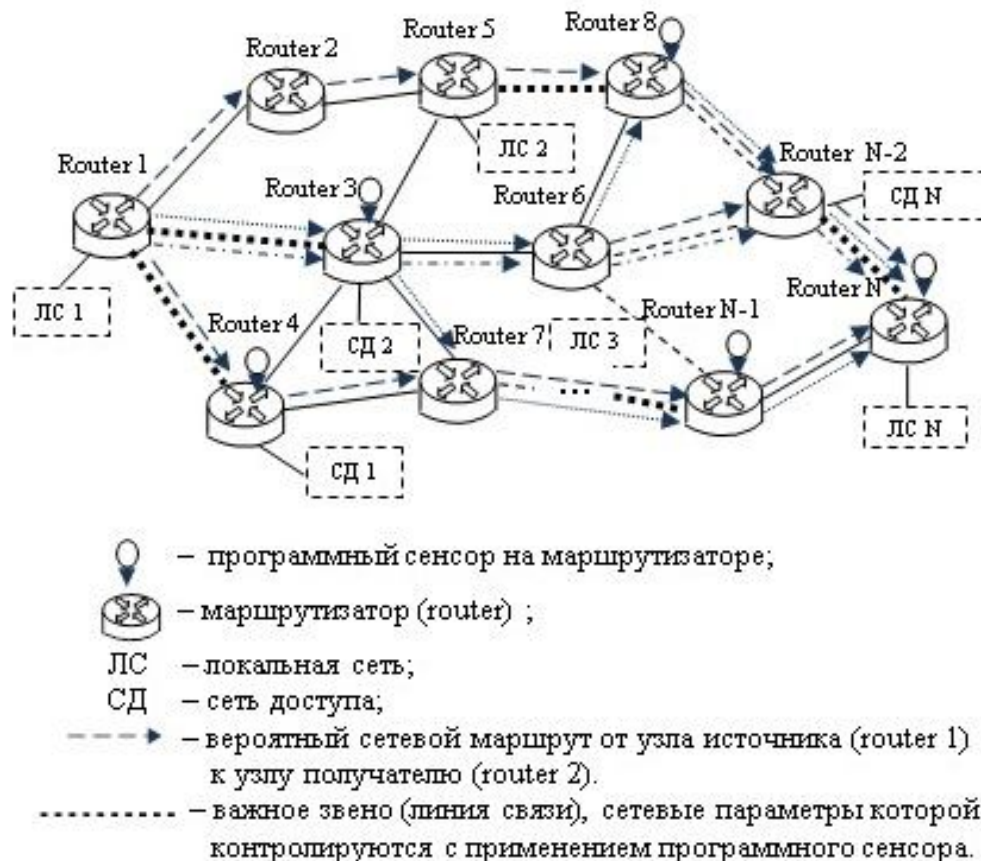


Рис. 1. Вариант частичного наблюдения за сетевыми маршрутами между Router 1 и Router N в мультисервисной сети связи i -го оператора

Fig. 1. A variant of partial monitoring of network routes between Router1 and Route N in the multi-service communication network of the i -th operator

3. Между классами ПТ и уровнями (классами) качества обслуживания $T_{\text{кач}}(z)$ в вероятном сетевом маршруте устанавливается соответствие, где $T_{\text{кач}}(z)$ – терм-множество значений ЛП «уровень (класс) качества обслуживания ПТ».

Для каждого уровня КОПТ присваивается значение ЛП «уровень (класс) качества обслуживания пакетного трафика».

Так, например, наиболее приоритетному классу (z_{max}) обслуживания ПТ, т. е. с наиболее высокими значениями

показателей качества обслуживания, соответствует значение ЛП $T_{\text{кач}}(z_{\text{max}})$ = «очень высокое качество обслуживания ПТ» и набор значений показателей X_z , обеспечивающих требуемое качество обслуживания.

При этом в качестве показателей КОПТ для описания уровня (класса) качества обслуживания применяются показатели качества обслуживания из множества $P\{z\}$, которые контролируются сетевыми сенсорами.

4. Нечеткие модели разных классов качества обслуживания для вероятных

сетевых маршрутов строятся в пространстве моделей качества обслуживания в важных звеньях сети с применением МАИ. При этом задача построения нечеткой модели класса качества обслуживания для k -го сетевого маршрута является задачей определения соответствующей функции принадлежности, значения которой отражают степень уверенности лица, принимающего решение (ЛПР), в том, что значения уровня качества обслуживания ПТ для важных звеньев сети соответствуют описываемому уровню (классу) качества обслуживания ПТ в k -м сетевом маршруте.

Нечеткая модель z -го уровня качества обслуживания в k -м маршруте передачи ПТ ($M_{k,z}$) имеет следующий вид:

$$M_{k,z} = \left\langle \begin{matrix} (\mu_{k,Z,e=1}, w_{k,e=1}, m_{k,Z,e=1}); \\ (\mu_{k,Z,e=2}, w_{k,e=2}, m_{k,Z,e=2}); \\ \dots; (\mu_{k,Z,e}, w_{k,e}, m_{k,Z,e}); \dots \end{matrix} \right\rangle, \quad (3)$$

где $\mu_{k,Z,e}$ – функция принадлежности (доверия) моделей разных классов обслуживания ПТ для важного (e -го) звена сети из состава k -го сетевого маршрута к модели z -го уровня качества обслуживания для k -го вероятного сетевого маршрута ($M_{k,z}$);

$$\mu_{k,Z,e} = \left\langle \begin{matrix} \mu_{k,Z,e/z=1,e}; \mu_{k,Z,e/z=1,e}; \\ \dots; \mu_{k,Z,e/z=1,e}; \dots \end{matrix} \right\rangle;$$

$\mu_{k,Z,e/z,e}$ – значение функции принадлежности модели z -го класса обслуживания ПТ для (e -го) важного звена сети ($m_{k,z,e} = m_{z,e}$) к модели z -го уровня качества обслуживания для k -го маршрута передачи ПТ ($M_{k,z}$);

$$\mu_{k,Z,e/z,e} = w_{k,e} \cdot \left(\frac{w_{k,z/z,e}}{w_{k,z(\max)/z,e}} \right);$$

$w_{k,z(\max)/z,e}$ – максимальное значение вес (приоритета) $w_{k,z/z,e}$ из множества $W_{k,z/z,e}$;

$$W_{k,z/z,e} = \langle w_{k,z/z=1,e}, w_{k,z/z=2,e}, \dots, w_{k,z/z,e}, \dots \rangle;$$

$w_{k,z/z,e}$ – вес (приоритет) модели z -го класса обслуживания ПТ для e -го важного звена сети ($m_{k,z,e} = m_{z,e}$) при описании z -го уровня качества обслуживания для k -го маршрута передачи ПТ ($M_{k,z}$) в пространстве альтернативных моделей разных классов обслуживания ПТ для e -го важного звена сети. Расчет веса (приоритета) $w_{k,z/z,e}$ производится на основании МАИ в пространстве альтернативных моделей разных классов обслуживания ПТ для e -го важного звена сети;

$w_{k,e}$ – весомость (приоритет) e -го важного звена сети при построении модели класса качества обслуживания в k -м сетевом маршруте;

$m_{k,Z,e} = m_{z,e} = \{m_{k,z,e}\}_{z=1 \dots N_{z,e}}$ – множество моделей разных классов (уровней) обслуживания ПТ в e -м важном звене сети связи из состава k -го маршрута ($m_{k,z,e}$);

$m_{k,z,e}$ – модель z -го класса качества обслуживания ПТ в k -м маршруте;

$N_{z,e}$ – количество моделей для разных классов обслуживания ПТ e -м звене сети связи.

Значение функции принадлежности множества распознанных моделей классов КОПТ для важных звеньев сети ($m_{k,z,e} = m_{z,e}$) к модели z -го уровня качества обслуживания для k -го сетевого маршрута ($M_{k,z}$) определяется в соответствии с выражением

$$\mu_{k,Z,расп} = \sum_{u_e \in U_k} \mu_{k,Z,e/z,e}, \quad (4)$$

где U_k – множество важных звеньев из состава k -го маршрута передачи ПТ.

5. Нечеткие модели для разных классов качества обслуживания в звеньях сети связи строятся в пространстве значений показателей КОПТ и базируются на МАИ. При этом задача построения нечеткой модели класса качества обслуживания в звене сети является задачей определения соответствующей функции принадлежности, значения которой отражают степень уверенности ЛПР в том, что наблюдаемые значения показателей качества обслуживания соответствуют описываемому классу качества обслуживания.

Предполагаем, что функции принадлежности значений разных показателей качества к одинаковым классам качества обслуживания в разных звеньях ККС являются одинаковыми.

Нечеткая модель z -го класса КОПТ в любом звене сети связи m_z (в частности, в e -м звене сети ($m_{z,e}$)) имеет следующий вид:

$$m_z = m_{z,e} = \left\langle (X_{z,\beta=1}, \mu_{z,\beta=1}); (X_{z,\beta=2}, \mu_{z,\beta=2}); \dots; (X_{z,\beta}, \mu_{z,\beta}); \dots \right\rangle, \quad (5)$$

$\mu_{z,\beta}$ – функция принадлежности значений β -го признака (показателя КОПТ) к модели z -го класса обслуживания для звена сети;

$$\mu_{z,\beta} = \langle \mu_{\alpha=1,\beta,z}; \mu_{\alpha=2,\beta,z}; \dots; \mu_{\alpha,\beta,z}; \dots \rangle;$$

$w_{z,\beta}$ – весомость β -го признака (показателя КОПТ) при описании z -го уровня (класса) качества обслуживания в звене сети;

$\mu_{\alpha,\beta,z}$ – значение функции принадлежности α -го значения β -го показателя КОПТ $x_{\alpha,\beta,z}$ к описанию (модели) z -го класса качества обслуживания в звене сети связи;

$$\mu_{\alpha,\beta,z} = w_{z,\beta} \cdot \left(\frac{w_{\alpha,\beta,z}}{w_{\alpha(\max),\beta,z}} \right), \quad (6)$$

$w_{\alpha(\max),\beta,z}$ – максимальное значение веса (приоритета) $w_{\alpha,\beta,z}$ из множества $W_{\beta,z}$;

$$W_{\beta,z} = \langle w_{\alpha=1,\beta,z}, w_{\alpha=2,\beta,z}, \dots, w_{\alpha,\beta,z}, \dots \rangle,$$

$w_{\alpha,\beta,z}$ – вес (приоритет) α -го значения β -го показателя КОПТ $x_{\beta,z}$ при описании (построении модели) z -го класса качества обслуживания ПТ в звене сети связи в пространстве альтернативных

значений β -го показателя качества обслуживания ПТ;

$X_{z,\beta}$ – множество значений β -го показателя качества обслуживания в звене сети связи;

$$X_{z,\beta} = \langle x_{\alpha=1,\beta,z}, x_{\alpha=2,\beta,z}, \dots, x_{\alpha,\beta,z}, \dots \rangle;$$

$x_{\alpha,\beta,z}$ – α -я градация β -го показателя качества передачи в звене сети.

Значение функции принадлежности наблюдаемого множества значений показателей КОПТ ($X_{z,набл}$) в z -м важном звене сети связи к модели z -го КОПТ в звене ККС определяется на основании следующего выражения

$$\mu_{z,e,расп} = \sum_{x_{\alpha,\beta,z} \in X_{z,набл}} \mu_{\alpha,\beta,z}; \quad (7)$$

где $X_{z,набл}$ – наблюдаемое множество значений показателей КОПТ в e -м звене ККС.

Результаты и их обсуждение

Для анализа особенностей, границ применения предложенного метода авторами проведены экспериментальные исследования для гипотетической ситуации в рамках принятых ограничений и допущений.

В рамках проведения эксперимента учитывались следующие допущения и ограничения:

1) во всех звеньях k -го сетевого маршрута имеются одинаковые потоки и скорости передачи пакетного трафика, а также близкие по значениям нагрузки.

Рассматривается ситуация с высокой нагрузкой ($\rho > 0,7$) в звеньях сети паетной связи [9; 11];

2) на интервале анализа $t_{анализ} = 30-60$ с, в т. ч. при повышении (при всплесках) активности пользователей, значение задержки IP-пакетов, джиттера в звеньях сети и сетевых маршрутах изменяется в соответствии с нормальным законом распределения, без учета несимметрии значений показателей КОПТ [7; 13];

3) случайные величины значений показателей КОПТ $x_{\beta,e,k,z}$ в звеньях из состава сетевого маршрута с z -м классом КОПТ с вероятностью близкой к 1 попадают в интервал $[M(x_{\beta,e,k,z}) + 3 \cdot \sigma_{\beta,e,k,z}; M(x_{\beta,e,k,z}) - 3 \cdot \sigma_{\beta,e,k,z}]$ [7; 13; 14], где $M(x_{\beta,e,k,z})$ ($\sigma_{\beta,e,k,z}$) – математическое ожидание (среднее квадратическое отклонение) значений β -го показателя КОПТ в e -м важном звене k -го сетевого маршрута с z -м классом КОПТ.

Считаем, что требуемое значение β -го показателя КОПТ (в частности, задержки, джиттера, процента потерь пакетов) в сетевом маршруте для обеспечения z -го класса КОПТ определяется в соответствии с выражением

$$x_{\beta,z,треб} = M(x_{\beta,e,k,z}) + 3 \cdot \sigma_{\beta,e,k,z};$$

4) в гипотетической ситуации при моделировании сетевого маршрута с z -м классом КОПТ верхние (максимальные) значения показателей КОПТ (в частности, показателя $x_{\beta,k}$) в звеньях сетевого

маршрута на интервале анализа $t_{\text{анализ}}$ равны.

В рамках проводимого эксперимента на основании известной статистики [3; 7; 11; 14] и теоретических расчетов строят статистические модели значений показателей качества обслуживания для звеньев сетевых маршрутов с разным классом КОПТ, учитывающие рассмотренные выше ограничения и допущения. Построенные статистические модели используются как базис для построения нечетких моделей уровня КОПТ в звеньях сети, а также для имитации граничных значений показателей качества обслуживания в звеньях из состава сетевого маршрута с разными классами КОПТ.

Статистические модели времени задержки и джиттера в e -м важном звене k -го сетевого маршрута с z -м классом КОПТ при количестве звеньев ($N_{k,z}$) представлены ниже.

$$M_{\text{зад.},k,e,z} = \left\langle T_{\text{ср.зад.},k,e,z}, \sigma_{\text{зад.},k,e,z}, N_{k,z}, f_{\text{норм.зад.}}(T_{\text{зад.},k,e,z} / z) \right\rangle; \quad (7)$$

$$f_{\text{норм.зад.}}(T_{\text{зад.},k,e,z} / z) = \frac{1}{\sigma_{\text{зад.},k,e,z} \sqrt{2\pi}} e^m;$$

$f_{\text{норм.зад.}}(T_{\text{зад.},k,e,z} / z)$ – плотность распределения случайной величины времени задержки $T_{\text{зад.},k,e,z}$ в e -м важном звене k -го сетевого маршрута с z -м классом КОПТ;

$$m = \frac{-(T_{\text{зад.},k,e,z} - T_{\text{ср.зад.},k,e,z})^2}{\sigma_{\text{зад.},k,e,z}^2};$$

$$T_{\text{ср.зад.},k,z} = (T_{\text{зад.макс.},k,z} / 2);$$

$$\sigma_{\text{зад.},k,e,z} = \frac{\sigma_{\text{зад.},k,z}}{\sqrt{N_{k,z}}}; \quad \sigma_{\text{зад.},k,z} = \frac{1}{6} \cdot T_{\text{зад.макс.},k};$$

$$M_{\text{дж.},k,e,z} = \left\langle T_{\text{ср.дж.},k,e,z}, \sigma_{\text{дж.},k,e,z}, N_{k,z}, f_{\text{норм.дж.}}(T_{\text{дж.},k,e,z} / z) \right\rangle; \quad (8)$$

$f_{\text{норм.дж.}}(T_{\text{дж.},k,e,z} / z)$ – плотность распределения случайной величины джиттера $T_{\text{дж.},k,e,z}$ в e -м важном звене k -го сетевого маршрута с z -м классом КОПТ;

$$f_{\text{норм.дж.}}(T_{\text{дж.},k,e,z} / z) = \frac{1}{\sigma_{\text{дж.},k,e,z} \sqrt{2\pi}} e^n;$$

$$n = \frac{-(T_{\text{дж.},k,e,z} - T_{\text{ср.дж.},k,e,z})^2}{\sigma_{\text{дж.},k,e,z}^2};$$

$$T_{\text{ср.дж.},k,z} = T_{\text{ср.дж.},k,z,e} = (T_{\text{зад.макс.},k} / 2);$$

$$\sigma_{\text{дж.},k,z} = \sigma_{\text{дж.},k,e,z} = \frac{1}{6} \cdot T_{\text{зад.макс.},k};$$

$\sigma_{\text{зад.},k,z}$ ($\sigma_{\text{дж.},k,z}$) – среднее квадратическое отклонение (СКО) времени задержки (джиттера) в k -м сетевом маршруте с z -м классом КОПТ; $T_{\text{ср.зад.},k,z}$ ($T_{\text{ср.дж.},k,z}$) – математическое ожидание времени задержки k -м сетевом маршруте с z -м классом КОПТ; $\sigma_{\text{зад.},k,e,z}$ ($\sigma_{\text{дж.},k,e,z}$) – СКО времени задержки (джиттера) в e -м звене k -го сетевого маршрута с z -м классом КОПТ; $T_{\text{ср.зад.},k,e,z}$ ($T_{\text{ср.дж.},k,e,z}$) – математическое ожидание времени задержки (джиттера) в e -м звене k -го сетевого маршрута с z -м классом КОПТ; $T_{\text{зад.макс.},k,z}$ ($T_{\text{дж.макс.},k,z}$) – максимальное (верхнее) значение задержки

(джиттера) в k -м сетевом маршруте с z -м классом КОПТ.

Учитывая ограниченные статистические данные, экспериментальная проверка разработанного метода проводится для гипотетических условий с учетом рассмотренных выше допущений и ограничений. При этом последовательность распознавания классов КОПТ в сетевом маршруте, соответствующая разработанному методу, изложена в рамках второго этапа проводимого эксперимента.

В рамках первого этап эксперимента производим подготовку исходных данных для решения задачи по распознавания КОПТ в вероятных сетевых маршрутах, а именно:

1. Моделируем участок опорной сети связи организации графом $G(Y_h, U_{h,c})$ (рис. 2). Y_h – h -я вершина графа опорной сети связи, соответствующая маршрутизатору; $u_{h,c}$ – h -е ребро (линия связи), соединяющее h -ю и c -ю вершину.

В качестве анализируемого выберем сетевой маршрут.

$$L_k(h1;h11) = (u_{1,3}, u_{3,7}, u_{7,10}, u_{10,11}).$$

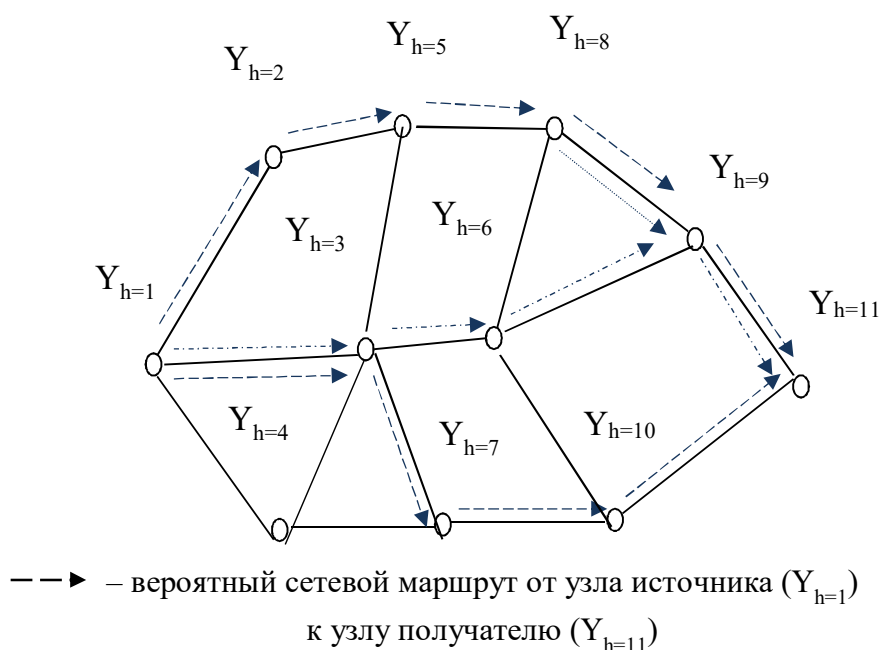


Рис. 2. Граф сетевых маршрутов от узла источника ($Y_{h=1}$) к узлу получателю ($Y_{h=11}$)

Fig. 2. Graph of network routes from the source node ($Y_{h=1}$) to the destination node ($Y_{h=11}$)

2. В рамках работы пакетный трафик внутри автономной ККС разделен

экспертами на классы с разными требованиями к КОПТ (табл. 1).

Таблица 1. Требования к качеству обслуживания для разных классов пакетного трафика**Table 1.** Quality of service requirements for different classes of packet traffic

Классы качества обслуживания пакетного трафика	Задержка доставки IP-пакета, IPTD, мс	Вариация задержки доставки IP-пакета, IPDV, мс	Вероятность % потерь IP-пакетов,	Стоимость информации	Уровень качества обслуживания на сетевом маршруте
Класс 1 – потоки реального времени (высококачественная пакетная телефония и видео-конференц-связь). В качестве потребителя выступает руководство предприятия	50	50	0,001	Очень высокая	«Очень высокий уровень»
Класс 2 – потоки реального времени (пакетная телефония, видео-конференц-связь). В качестве потребителя выступает инженерно-технический персонал	200	100	0,001	Очень высокая	«Высокий уровень»
Класс 3 – транзакции данных, отличающиеся высокой стоимостью (в частности, бизнес-транзакции внутри организации)	300	150	0,005	Высокая	«Ниже высокого уровня»
Класс 4 – транзакции данных, интерактивные (сигнализация, управление процессом производства)	400	150	0,008	Выше среднего	«Выше среднего уровня»

3. Определены параметры статистической модели ($M_{k,e,z} = \langle M_{\text{зад.},k,e,z}, M_{\text{дж.},k,e,z} \rangle$) e -го важного звена k -го сетевого маршрута с разными классами КОПТ при количестве звеньев ($N_{k,zv.}$), равном 4 (табл. 2).

В качестве контрольных точек выбраны значения показателей КОПТ

(времени задержки и джиттера) со следующими значениями:

$$a) T_{\text{зад.},k,e,z} = T_{\text{ср.зад.},k,e,z} + \sigma_{\text{зад.},k,e,z},$$

$$T_{\text{зад.},k,e,z} = T_{\text{ср.зад.},k,e,z} + 2 \cdot \sigma_{\text{зад.},k,e,z};$$

$$b) T_{\text{дж.},k,e,z} = T_{\text{ср.дж.},k,e,z} + \sigma_{\text{дж.},k,e,z},$$

$$T_{\text{дж.},k,e,z} = T_{\text{ср.дж.},k,e,z} + 2 \cdot \sigma_{\text{дж.},k,e,z}.$$

Таблица 2. Параметры статистической модели важного звена сетевого маршрута с z -м классом качества обслуживания при количестве звеньев в маршруте, равном 4**Table 2.** Parameters of the statistical model of an important link of a network route with the z -th class of service quality with the number of links in the route equal to 4

z -й класс КОПТ в e -м звене из состава k -го сетевого маршрута	$T_{\text{ср.зад.},k,e,z}$	$\sigma_{\text{зад.},k,e,z}$	$T_{\text{ср.дж.},k,e,z}$	$\sigma_{\text{дж.},k,e,z}$
$z=1$	6,25	4,17	8,3	4,81
$z=2$	25,00	16,67	16,67	9,62
$z=3$	37,5	25,0	25,00	14,43
$z=4$	50	33,33	25,00	14,43

Полученные статистические модели звеньев сети с разными классами качества обслуживания использованы авторами в качестве базиса при построении нечетких моделей. В частности, для ограничения диапазона значений показателей КОПТ для моделей звеньев сети с разными классами КОПТ, ассиметрии функций принадлежности признаков (в частности, значений показателей КОПТ).

4. Построены нечеткие модели для разных классов (уровней) КОПТ в звеньях сети и сетевом маршруте для гипотетической ситуации.

Для сравнения предпочтительности значений признаков распознавания по отношению к описанию звеньев сети и сетевых маршрутов с разными классами КОПТ применен МАИ.

В качестве нечетких моделей для звеньев сети ($m_{z,e}$) с разными классами КОПТ при $N_{k,зв} = 4$ выделены:

– модель ($m_{z=1,N_{k,зв}=4}$) очень высокого уровня (($z=1$)-го класса) КОПТ при $N_{k,зв}=4$;

– модель ($m_{z=2,N_{k,зв}=4}$) высокого уровня (($z=2$)-го класса) КОПТ при $N_{k,зв}=4$;

– модель ($m_{z=3,N_{k,зв}=4}$) ниже высокого уровня (($z=3$)-го класса) КОПТ при $N_{k,зв}=4$;

– модель ($m_{z=4,N_{k,зв}=4}$) выше среднего уровня (($z=4$)-го класса) КОПТ при $N_{k,зв}=4$.

При этом оценки значений функции принадлежности градаций задержки ($\mu_{z,\beta=1}$), вариации задержки ($\mu_{z,\beta=2}$) доставки IP-пакета к модели z -го класса обслуживания в звене сети представлены ниже (рис. 3, 4).

Значения весовых коэффициентов показателей КОПТ при описании z -го уровня (класса) качества обслуживания в звене сети ($w_{z,\beta}$):

– для задержки в звене сети – $w_{z,\beta=1} = 0,45$;

– для джиттера в звене сети – $w_{z,\beta=2} = 0,35$;

– для процента (вероятности) потерянных IP-пакетов в звене сети – $w_{z,\beta=3} = 0,2$.

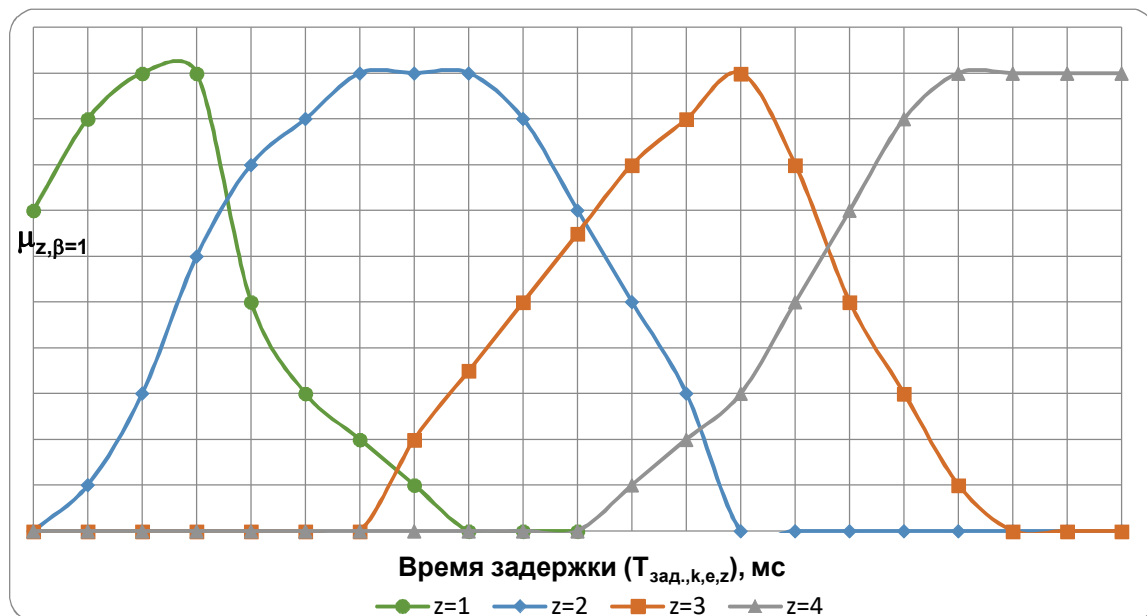


Рис. 3. Функция принадлежности значений времени задержки к моделям звеньев с разными классами КОПТ (z обозначает класс КОПТ в звене сети)

Fig. 3. The function of belonging the delay time values to the models of links with different classes of QOPT (z denotes the QOPT class in the network link)

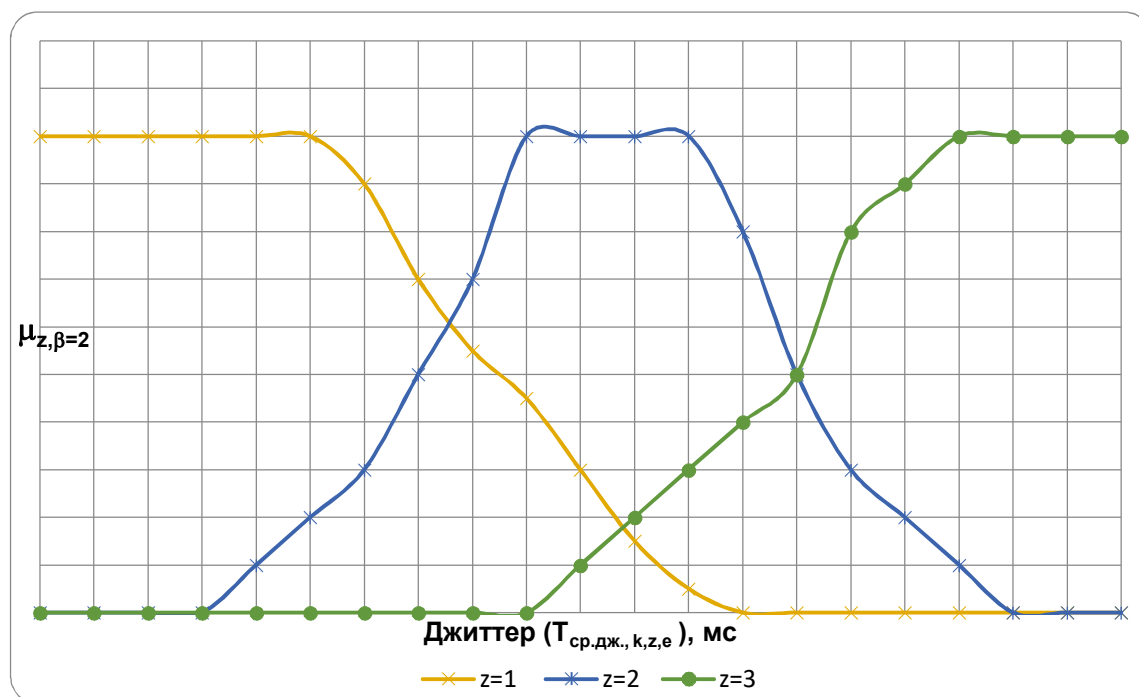


Рис. 4. Функция принадлежности значений джиттера к моделям звеньев с разными классами КОПТ (z обозначает класс КОПТ в звене сети)

Fig. 4. The function of jitter values belonging to link models with different QOPT classes (z denotes the QOPT class in the network link)

5. Построены нечеткие модели для разных классов (уровней) КОПТ в сетевом маршруте для гипотетических ситуаций (табл. 3).

Построение функций принадлежности моделей звеньев сети с разными классами КОПТ $m_{z,e,k}$ к моделям сетевых маршрутов ($M_{k,z}$) с разными классами КОПТ, а также оценки весовых коэффициентов ($w_{k,e}$) для важных звеньев базируются на экспертных знаниях и МАИ, анализе известной статистики [3; 7; 11; 14].

Учитывая, что для определения уровня взаимосвязи (в частности, коэффициента линейной корреляции) [8] между значениями показателей КОПТ в звеньях сети и сетевых маршрутах требуется большой объем статистических данных, в рамках проводимого эксперимента выбор важных звеньев сети был произведен экспертами. В качестве важных звеньев сетевого маршрута выбраны звено $u_{1,3}$ и звено $u_{7,10}$.

Отметим, что создание базы данных о значениях коэффициентов корреляции между показателями качества обслуживания в элементах сети пакетной связи (звеньях сети, сетевых маршрутах) в типовых условиях позволит значительно упростить решение указанной задачи.

Для весовых коэффициентов $w_{k,e}$ получены следующие значения:

$w_{k=1,u_{1,3}} = 0,43$, $w_{k=1,u_{7,10}} = 0,57$. При расчете весовых коэффициентов $w_{k,e}$ предполагали, что наблюдаемые значения показателей КОПТ в звене $u_{7,10}$ наиболее близки к средним значениям показателей и уровню (классу) КОПТ в k -м сетевом маршруте. Это предположение позволило повысить приоритет (весомость) для важного звена $u_{7,10}$ (модели $m_{k,z,e} = m_{z,e}$) при построении модели z -го уровня КОПТ в k -м сетевом маршруте ($M_{k,z}$), а тем самым обеспечить правильное распознавание как показано ниже.

Результаты распознавания КОПТ в звеньях сети и сетевом маршруте в гипотетических ситуациях представлены ниже.

Наблюдаемые значения показателей КОПТ в сетевых маршрутах с разными классами КОПТ в разных гипотетических ситуациях представлены в таблице 4. Эти данные базируются на ранее рассмотренных допущениях и ограничениях. При моделировании гипотетических ситуаций учитывалось, что в течение времени анализа $t_{\text{анализ}}$ в половине звеньев сетевого маршрута с z -м классом КОПТ всплески активности, уровень нагрузки приводят к увеличению значения показателей КОПТ ($x_{\beta,k,e,z}$) до значения равного $M(x_{\beta,k,e,z}) + 2 \cdot \sigma_{\beta,k,e,z}$, а для остальных звеньев — до $M(x_{\beta,k,e,z}) + \sigma_{\beta,k,e,z}$.

Таблица 3. Нечеткие модели для разных классов (уровней) КОПТ в k-м сетевом маршруте при количестве звеньев, равном 4**Table 3.** Fuzzy models for different classes (levels) QOPT in the k-th network route with the number of links equal to 4

Модели z-го класса КОПТ для важного звена сети	Важные звенья из состава k-го сетевого маршрута							
	e = u _{1,3}				e = u _{7,10}			
	M _{k,z=1}	M _{k,z=2}	M _{k,z=3}	M _{k,z=4}	M _{k,z=1}	M _{k,z=2}	M _{k,z=3}	M _{k,z=4}
m _{k,z=1,e}	0,43	0,215	0,043	0	0,57	0,285	0,057	0
m _{k,z=2,e}	0,215	0,43	0,215	0,086	0,285	0,57	0,285	0,114
m _{k,z=3,e}	0,086	0,215	0,43	0,215	0,114	0,285	0,57	0,285
m _{k,z=4,e}	0	0,043	0,215	0,43	0	0,057	0,285	0,57

Таблица 4. Значения показателей КОПТ в сетевых маршрутах с разными классами КОПТ в гипотетических ситуациях***Table 4.** Values of service quality indicators in network routes with different classes of service quality in hypothetical situations*

Значение показателя КОПТ	u _{1,3}	u _{3,7}	u _{7,10}	u _{10,11}	Значения показателей КОПТ в сетевом маршруте
Гипотетическая ситуация 1. Наблюдаемые значения показателей КОПТ в сетевом маршруте с (z=1)-м классом КОПТ					
T _{зад} ^{**} , мс	≈14,59	≈14,59	≈10,42	≈10,42	50
T _{дж} ^{**} , мс	≈41,66	≈41,66	≈33,33	≈33,33	Не более 42
Гипотетическая ситуация 2. Наблюдаемые значения показателей КОПТ в сетевом маршруте с (z=2)-м классом КОПТ					
T _{зад} , мс	≈58,34	≈58,34	≈41,67	≈41,67	200
T _{дж} , мс	≈83,34	≈83,34	≈66,67	≈66,67	Не более 84
Гипотетическая ситуация 3. Наблюдаемые значения показателей КОПТ в сетевом маршруте с (z=3)-м классом КОПТ					
T _{зад} , мс	≈87,5	≈87,5	≈62,5	≈62,5	300
T _{дж} , мс	≈125	≈125	≈100	≈100	Не более 125

* Процент потерь (IPLR) для всех гипотетических ситуаций не превышает $1 \cdot 10^{-5}$, что соответствует требуемому значению для всех рассматриваемых классов КОПТ.

** T_{зад} – значение времени задержки; T_{дж} – значение джиттера.

1. Наблюдаемые (моделируемые) значения признаков для выбранных гипотетических ситуаций и оценки значений функции принадлежности ($\mu_{\alpha,\beta,z}$) гра-

даций β -го признака (показателя КОПТ $x_{z,\beta,\alpha}$) к модели z -го класса обслуживания для звена сети ($m_{z,e}$) представлены ниже (табл. 5).

Таблица 5. Наблюдаемые (моделируемые) значения признаков и оценки значений функции принадлежности $\mu_{\alpha,\beta,z}$

Table 5. Observed (modeled) values of features and estimates of the values of the membership function $\mu_{\alpha,\beta,z}$

Значения показателей КОПТ		$\mu_{\alpha,\beta=1,z} = \mu(m_{z,e}/T_{\text{зад}})$			
$T_{\text{зад}}$		$z=1$	$z=2$	$z=3$	$z=4$
$T_{\text{зад}} = 14,59$ мс		0,6	0,18	0	0
$T_{\text{зад}} = 10,42$ мс		0,6	0,18	0	0
$T_{\text{зад}} = 58,34$ мс		0	0,3	0,48	0,06
$T_{\text{зад}} = 41,67$ мс		0	0,6	0,21	0
$T_{\text{зад}} = 87,5$ мс		0	0,0	0,06	0,6
$T_{\text{зад}} = 62,5$ мс		0	0,18	0,54	0,12
Значения показателей КОПТ		$\mu_{\alpha,\beta=2,z} = \mu(m_{z,e}/T_{\text{дж}})$			
$T_{\text{дж.}}$		$z=1$	$z=2$	$z=3$	$z=4$
$T_{\text{дж}} = 41,67$ мс		0,22	0,28	0	0
$T_{\text{дж}} = 33,33$ мс		0,36	0,12	0	0
$T_{\text{дж}} = 83,34$ мс		0	0,08	0,36	0,36
$T_{\text{дж}} = 66,67$ мс		0	0,32	0,16	0,16
$T_{\text{дж}} = 125$ мс		0	0	0,4	0,4
$T_{\text{дж}} = 100$ мс		0	0	0,4	0,4
Значения показателей КОПТ		$\mu_{z,e,\text{расп}} = \mu_{z,e,\text{расп}}(m_{z,e}/T_{\text{зад}}, T_{\text{дж}})$			
$T_{\text{зад}}$	$T_{\text{дж.}}$	$z=1$	$z=2$	$z=3$	$z=4$
14,59	41,67	0,82	0,46	0	0
10,42	33,33	0,96	0,3	0	0
58,34	83,34	0	0,38	0,84	0,42
41,67	66,67	0	0,92	0,37	0,16
87,5	125	0	0	0,46	1
62,5	100	0	0,18	0,94	0,52

2. Для оценки значений ФП $\mu_{k,Z,e/z,e}$ модели (e -го) важного звена сети ($m_{k,z,e} = m_{z,e}$) с z -м классом КОПТ к модели k -го сетевого маршрута с z -м уровнем (классом) КОПТ ($M_{k,z}$) используются исходные данные (см. табл. 4).

Выбор модели $M_{k,z}$ для k -го сетевого маршрута производится на основании оценок значений ФП $\mu_{k,Z,расп}$ (табл. 6). Полученные максимальные оценки $\mu_{k,Z,расп}$ соответствуют моделируемым классам КОПТ в k -м сетевом маршруте в рассматриваемых гипотетических ситуациях (см. табл. 6).

Таблица 6. Оценки значений функции принадлежности $\mu_{k,Z,расп}$

Table 6. Estimates of the values of the membership function $\mu_{k,Z,расп}$

Распознаваемая модель $m_{z,e}$ для e -го звена		Значение функции принадлежности $\mu_{k,Z,e/z,e}$				Фактически моделируемый класс КОПТ в k -м сетевом маршруте
$e=u_{1,3}$	$e=u_{7,10}$	$M(z=1,k)$	$M(z=2,k)$	$M(z=3,k)$	$M(z=4,k)$	
$m_z=1,e$	$m_z=1,e$	1	0,5	0,1	0	$z=1$
$m_z=3,e$	$m_z=2,e$	0,371	0,785	0,715	0,329	$z=2$
$m_z=4,e$	$m_z=3,e$	0	0,1	0,5	1	$z=3$

Выводы

Таким образом, предлагается метод распознавания класса (уровня) качества обслуживания сетевыми маршрутами в условиях быстрых изменений пакетного трафика и импликантного (частичного) наблюдения сетью сетевых сенсоров, базирующийся на нечетких моделях разных классов обслуживания пакетного трафика важными звеньями сети связи и сетевыми маршрутами, применении сетевых протоколов управления, корреляционном анализе, функциях принадлежности, методе анализа иерархий.

Метод позволит повысить оперативность и достоверность мониторинга состояния сетевых маршрутов, снизить загрузку линий передачи в мультисервисных сетях операторов связи, автономных сетях, больших корпоративных сетях.

На основе экспериментальных исследований, проведенных для гипотетических ситуаций, доказана целесообразность применения разработанного метода для распознавания уровня качества обслуживания в сетевом маршруте в условиях частичного наблюдения и принятых ограничениях.

Список литературы

1. Новиков С. Н. Классификация методов маршрутизации в мультисервисных сетях связи // Вестник Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 2013. № 1 (21). С. 57-67.
2. Исхаков С. Ю., Шелупанов А. А., Тимченко С. В. Прогнозирование в системе мониторинга локальных сетей // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 1 (25). С. 100-103.
3. Бабкин В. А., Строганова Е. П. Методы оценки качества передачи данных в пакетных сетях связи // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13, № 11. С. 25-31.
4. Ушанев К. В., Макаренко С. И. Показатели своевременности обслуживания трафика в системе массового обслуживания Ра/М/1 на основе аппроксимации результатов имитационного моделирования // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 1. С. 42-65.
5. Костенко Е. Ю., Дуйсенгалиев Р. Р., Барабанова Е. А. Система мониторинга для контроля трафика технологических сетей передачи данных // Вестник Астраханского государственного технического университета Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2015. № 4. С. 100-108.
6. Якимова И. А. Оперативность информационного обмена в сетях с многопротокольной коммутацией по меткам: дис. ... канд. техн. наук. Серпухов, 2016. 150 с.
7. Соколов А. Н. Методы анализа задержек IP-пакетов в сети следующего поколения: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2011. 136 с.
8. Гржибовский А. М., Унгурану Т. Н. Корреляционный анализ с использованием пакета статистических программ STATA // Экология человека. 2014. № 9. С. 60–64.
9. Васин Н. Н., Иванова Е. А. Методика борьбы с перегрузками в сетях пакетной коммутации на основе нечеткой логики // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11, № 9. С. 15-21.
10. Волокобинский М. Ю., Пекарская О. А., Рази Д. А. Принятие решений на основе метода анализа иерархий // Финансы: теория и практика. 2016. Т. 20, № 2. С. 33-42.
11. Саламех Немер. Анализ и разработка метода оценки скорости звеньев мультисервисной сети при совместном обслуживании неоднородного трафика реального времени: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 164 с.
12. Михеев А. В. Исследование методов сбора статистических данных о трафике в IP-сетях передачи данных // Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления: сборник докладов II Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Уральский федеральный университет. Екатеринбург, 2016. С. 121-130.

13. Михайлов С. К., Сергеева Т. П. Расчет вариации задержки (IPDV) для телефонного соединения // *T_Comm*. 2013. Т. 7, № 7. С. 87–89.

14. Бахарева Н. Ф., Тарасов В. Н. Аппроксимативные методы и модели массового обслуживания. Исследование компьютерных сетей. Самара: Изд-во Самарского научного центра Российской академии наук, 2017. 327 с.

References

1. Novikov S. N. Klassifikatsiya metodov marshrutizatsii v mul'tiservisnykh setyakh svyazi [Classification of routing methods in multiservice communication networks]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta telekommunikatsiy i informatiki = Bulletin of the Siberian State University of Telecommunications and Informatics*, 2019, no. 1 (21), pp. 106-109.

2. Iskhakov S. Yu, Shelupanov A. A., Timchenko S. V. Prognozirovanie v sisteme monitoringa lokal'nykh setei [Forecasting in the local network monitoring system]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2012, no. 1 (25), pp. 100-103.

3. Babkin V. A., Stroganova E. P. Metody otsenki kachestva peredachi dannykh v paketnykh setyakh svyazi [Methods for assessing the quality of data transmission in packet communication networks.] *T-Comm: Telekommunikatsii i transport = T-Comm: Telecommunications and Transport*, 2019, vol. 13, no.11, pp. 25-31.

4. Ushanev K. V., Makarenko S. I. Pokazateli svoevremennosti obsluzhivaniya trafika v sisteme massovogo obsluzhivaniya Pa/M/1 na osnove approksimatsii re-zul'tatov imitatsionnogo modelirovaniya [Indicators of timely traffic service in the Pa/M/1 queuing system based on the approximation of simulation results]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Control, Communication and Security Systems*, 2016, no. 1, pp. 42-65.

5. Kostenko E. Y., Duisengaliev R. R., Barabanova E. A. Sistema monitoringa dlya kontrolya trafika tekhnologicheskikh setei peredachi dannykh [A monitoring system for monitoring the traffic of technological data transmission networks]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Seriya: Management, Computer Engineering and Informatics*, 2015, no. 4, pp. 100-108.

6. Yakimova I. A. Operativnost' informatsionnogo obmena v setyakh s mnogoprotokol'noi kommutatsiei po metkam. Diss. kand. tekhn. nauk [Efficiency of information exchange in networks with multi-protocol switching by tags. Cand. tech. sci. diss.]. Serpukhov, 2016. 150 p.

7. Sokolov A. N. Metody analiza zaderzhek IP-paketov v seti sleduyushchego pokoleniya. Diss. kand. tekhn. nauk [Methods of analyzing IP packet delays in the next-generation network. Cand. techn. sci. diss.]. St. Petersburg, 2011. 136 p.
8. Grzhibovskiy A. M., Ungureanu T. N. Korrelyatsionnyi analiz s ispol'zovani-em paketa statisticheskikh programm STATA [Correlation analysis with the use of the statistical software package STATA]. *Ekologiya cheloveka = Ecology of the Human Century*, 2014, no. 9, pp. 60-64.
9. Vasin N. N., Ivanova E. A. Metodika bor'by s peregruzkami v setyakh paketnoi kommutatsii na osnove nechetkoi logiki [Overload control methods in packet switching networks based on fuzzy logic]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport = T-Comm: Telecommunications and Transport*, 2017, vol. 11, no. 9, pp. 15-21.
10. Volokobinsky M. Yu., Pekarskaya O. A., Razi D. A. Prinyatie reshenii na osnove metoda analiza ierarkhii [Decision-making based on the hierarchy analysis method]. *Finansy: teoriya i praktika = Finance: Theory and Practice*, vol. 20, no. 2, pp. 33-42.
11. Salamekh Nemer. Analiz i razrabotka metoda otsenki skorosti zvenyev multiservisnoy seti pri sovmestnom obsluzhivanii neodnorodnogo trafika realnogo vremeni. Diss. kand. tekhn. nauk [Analysis and development of a method for estimating the speed of multiservice network links when jointly servicing heterogeneous real-time traffic. Cand. techn. sci. diss.]. Moscow, 2016. 164 p.
12. Mikheev A. V. [Research of methods for collecting statistical data on traffic in IP data transmission networks]. *Informatsionnyye tekhnologii, telekommunikatsii i sistemy upravleniya. Sbornik dokladov II Mezhdunarodnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Information technologies, telecommunications and management systems. Collection of reports the 2nd International Conference of students, postgraduates and young scientists]. Yekaterinburg, Ural Federal University Publ., 2016, pp. 121-130. (In Russ.).
13. Mikhaylov S. K., Sergeyeva T. P. Raschet variatsii zaderzhki (IPDV) dlya tele-fon-nogo soedineniya [Telefon aloqasi uchun kechikish (IPTV) o'zgarishini hisoblash]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport = T-Comm: Telecommunications and Transport*, 2013, vol. 7, no. 7, pp. 87-89.
14. Bakhareva N. F., Tarasov V. N. Approksimativnyye metody i modeli masso-vogo obsluzhivaniya. Issledovaniye kompyuternykh setey [Approksimativnyye method I obsluzhivaniya model masso-vogo. Issledovaniye komputernykh setey.]. Samara, Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 2017. 327 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

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

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

Стребков Дмитрий Александрович, кандидат
технических наук, доцент, инженер,
АО «Электроагрегат», г. Курск,
Российская Федерация,
e-mail: dmitrstrebkovd@mail.ru

Dmitry A. Strebkov, Cand. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Engineer,
JSC "Electro-agregat", Kursk, Russian
Federation,
e-mail: dmitrstrebkovd@mail.ru

УДК 629.7

Структура приемного тракта модуля обработки сообщений автоматического зависимого наблюдения-вещания

Е. А. Титенко¹ ✉, А. Н. Щитов¹, А. П. Локтионов¹, А. Е. Архипов¹,
Б. А. Шиянов², А. Г. Яшин³

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

² Международный институт компьютерных технологий
ул. Солнечная 29 Б, г. Воронеж 394026, Российская Федерация

³ АО «Авиаавтоматика» им. В. В. Тарасова»
ул. Запольная 47, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: johntit@mail.ru

Резюме

Цель исследования – проработка и поиск вариантов структуры приемной тракта системы сообщений автоматического зависимого наблюдения-вещания.

Методы исследования основаны на структурно-параметрическом синтезе измерительно-вычислительных средств. Созданы варианты архитектуры систем автоматического зависимого наблюдения-вещания с детализированным составом приемной, преобразующей и обрабатывающей частей. Исследование вариантов схемы приемного тракта электронного модуля приема сообщений автоматического зависимого наблюдения-вещания продемонстрировало, что лучшим (по коэффициенту усиления) является вариант с последовательной двухкаскадной частью «усиление-фильтрация», а наиболее надежным (по уровню рабочего напряжения) является вариант с интегральной микросхемой обработки сигнала.

Результаты. Малая космонавтика является одной из наиболее перспективных областей развития высокотехнологичной продукции. Малые космические аппараты как автономные исследовательские мини-лаборатории или роботизированные системы применяются для решения задач дистанционного зондирования Земли, организации систем космической связи, проведения научных экспериментов в условиях космоса и др. Система автоматического зависимого наблюдения-вещания, используемая для оперативного мониторинга положения воздушных судов, является одной областей, функции которой расширяются за счет использования малых космических аппаратов как дополнительных приемо-передающих средств. Функционируя на орбите 400-500 км, группировка малых космических аппаратов обеспечивает прием сообщений автоматического зависимого наблюдения-вещания и их дальнейшую обработку с целью выделения летных характеристик воздушных судов (координаты, скорость, курс, абсолютная высота и др.). Полученные варианты позволяют детализировать архитектуру модуля и структуру приемной тракта в зависимости от выбранных целевых показателей (коэффициенты усиления, отношение сигнал/шум, мощность потребления).

© Титенко Е. А., Щитов А. Н., Локтионов А. П., Архипов А. Е., Шиянов Б. А., Яшин А. Г., 2021

Заключение. Анализ вариантов архитектуры модуля позволил детализировать структурную организацию электронного модуля приема сообщений в составе блоков приема, оцифровки сигнала и дешифрирования сообщений АЗН-В. Показано, что наиболее критичный блок приема сигнала должен оцениваться по коэффициентам усиления, сигнал/шум, мощности потребления.

Ключевые слова: архитектура; координаты воздушного судна; коэффициенты усиления; автоматическое зависимое наблюдение-вещание.

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

Для цитирования: Структура приемного тракта модуля обработки сообщений автоматического зависимого наблюдения-вещания / Е. А. Титенко, А. Н. Щитов, А. П. Локтионов, А. Е. Архипов, Б. А. Шиянов, А. Г. Яшин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 3. С. 102–120.

Поступила в редакцию 18.07.2021

Подписана в печать 11.08.2021

Опубликована 30.09.2021

The Structure of the Receiving Path of the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast Message Processing Module

Evgeny A. Titenko¹ ✉, Alexey N. Shchitov¹, Askold P. Loktionov¹,
Alexander E. Arhipov¹, Boris A. Shiyanov², Alexey G. Yaschin³

¹ Southwest State University

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

² International Computer Technology Institute

29 B Solnechnaya str., Voronezh 394026, Russian Federation

³ JSC "Aviaavtomatika" them. V. V. Tarasova"

47 Zapolnaya str., Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: johntit@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to study and search for options for the structure of the receiving path of the automatic dependent surveillance-broadcast message system.

Research methods are based on structural-parametric synthesis of measuring and computing facilities. Variants of the architecture of automatic dependent surveillance-broadcasting systems with a detailed composition of the receiving, converting and processing parts have been created. The study of the options for the scheme of the receiving path of the electronic module for receiving messages of automatic dependent observation-broadcasting showed that the best (in terms of gain) is the option with a sequential two-stage "gain-filtering" part, and the most reliable (in terms of the operating voltage level) is the option with an integrated processing circuit signal.

Results. Small astronautics is one of the most promising areas for the development of high-tech products. Small spacecraft as autonomous research mini-laboratories or robotic systems are used to solve problems of remote sensing of the Earth, organize space communication systems, conduct scientific experiments in space, etc. one area, the functions of which are expanded through the use of small spacecraft as additional transmitting and receiving means.

Operating in an orbit of 400-500 km, a grouping of small spacecraft provides reception of messages of automatic dependent observation-broadcasting and their further processing in order to highlight the flight characteristics of aircraft (coordinates, speed, course, altitude, etc.). The obtained variants allow us to detail the architecture of the module and the structure of the receiving path, depending on the selected target indicators (gain coefficients, signal-to-noise ratio, application power).

Conclusion. *The analysis of the module architecture options made it possible to detail the structural organization of the electronic module for receiving messages as part of the blocks for receiving, digitizing the signal and decrypting ADS-B messages. It is shown, that the most critical block of signal reception should be evaluated in terms of gain, signal / noise, application power).*

Keywords: *architecture; aircraft coordinates; gain factors; automatic dependent surveillance-broadcast.*

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

For citation: Titenko E. A., Shchitov A. N., Loktionov A. P., Arhipov A. E., Shiyonov B. A., Yaschin A. G. The structure of the receiving tract of the module for processing messages of automatic dependent observation-broadcasting. *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.* 2021; 11(3): 102–120. (In Russ.)

Received 18.07.2021

Accepted 11.08.2021

Published 30.09.2021

Введение

В настоящее время в качестве системы, способной без значительных финансовых и временных затрат обеспечить мониторинг местоположения воздушного судна в нормальных условиях полета каждые 15 минут, является система спутникового автоматического зависимого наблюдения-вещания (АЗН-В). АЗН-В – эта система наблюдения за ВС, основанная на передаче информации о состоянии и характеристиках ВС на наземный пункт управления. Постоянно передаваемые координаты скорости и курса ВС являются важнейшими летными характеристиками, используемыми в информационно-технических системах обеспечения безопасности полетов гражданской авиации. Кроме того,

сигналы АЗН-В могут приниматься и обрабатываться не только в наземном пункте управления, но и на борту другого воздушного судна (ВС) или космического аппарата. Тем не менее в настоящее время оригинальных отечественных схем и алгоритмических решений, полноценно использующих систему АЗН-В с учетом ограниченных вычислений на борту малых космических аппаратов, не существует, что делает этап разработки модуля приема-передачи информации с ВС на наземный центр мониторинга актуальным и практически значимым.

Материалы и методы

Главный замысел и актуальность исследования связаны с разработкой структурной схемы модуля определения

местоположения малых космических аппаратов на основе сигналов АЗН-В. Совмещение процессов приема, декодирования сообщений и накопления данных от АЗН-В передатчиков (а при необходимости – передачи данных о ВС в наземные пункты управления) позволяет существенно повысить эффективность использования МКА.

Группировка МКА, оснащенная такими модулями АЗН-В, служит базой не

только проведения космического эксперимента, но и основой по созданию глобальной системы, состоящей из группировки МКА, оснащенной аппаратурой приема и обработки сигналов систем АЗН-В и наземных приемных пунктов [1; 2; 3; 4; 5]. Такая распределенная группировка МКА позволит осуществлять непрерывный мониторинг движения воздушных судов (рис. 1) по всему земному шару в масштабе времени, близком к реальному.



Рис. 1. Работа МКА по мониторингу воздушных судов

Fig. 1. The work of the ICA on aircraft monitoring

Сигнал, формируемый передатчиком АЗН-В, передается с частотой 2 МГц, он имеет префикс (преамбулу) длительностью 8 мкс и сообщение определенной структуры длительностью

10 мс. Энергетика выходного сигнала, передаваемого с борта ВС, составляет около 24dBW (250W), что достаточно для передачи сигналов АЗН-В в назем-

ные центры приема без существенной потери сигнала и без появления шумов в нем [6; 7; 8; 9].

Вместе с тем количество и расположение антенн на ВС рассчитано на передачу сигнала АЗН-В в наземный пункт или ближайшим ВС, находящимся в зоне приема. Круговая диаграмма направленности антенны в целом позволяет передавать сигнал АЗН-В на борт МКА для приема и последующей обработки. МКА способен принять ослабленный и искаженный сигнал при должном усилении и фильтрации. Среди причин, влияющих на характеристики приема сигнала АЗН-В, выделяются [10; 11; 12; 13; 14]:

- значительные расстояния до МКА (орбита – 400-600 км);
- ослабление энергетики сигнала;
- воздействие атмосферных факторов;
- сложная радиообстановка, т. е. отношение сигнал-шум находится в диапазоне $\Delta = 5 \dots 15$ дБ, что очень мало для обычного приема;
- наличие прямого и отраженного сигнала.

В связи с этим состав, структурно-функциональная организация модуля АЗН-В и собственно приемной его приемного тракта существенно влияют на процессы обработки сигнала АЗН-В, особенно в части радиоприема.

Общая архитектура электронного модуля приема АЗН-В сообщений относится к классу измерительно-вычислительных систем, совмещающих приемно-фильтрующую часть, аналого-цифровой преобразователь и вычислительную часть, реализующую дешифрирование пакета АЗН-В с функцией записи целевых полей данных (скорость, координаты, абсолютная высота и др.) в энергонезависимую память [15; 16; 17; 18; 19; 20].

В общем случае возможны варианты архитектур, имеющие свои технические особенности.

Архитектура электронного модуля АЗН-В с усиленной антенной частью показана на рисунке 2. В данной архитектуре компенсация искажений сигнала и нейтрализация шумов выполняется за счет согласования приема сигнала от двух разнесенных по корпусу антенн, расположенных на верхних плоскостях борта. Аналоговый умножитель по выходу двух антенн (возможно добавление третьей антенны с узкополосным приемом для корректировки) позволяет частично устранить шумы. Последующий один каскад из малошумящего усилителя и полосового фильтра позволяет получить аналоговый сигнал с отношением сигнал/шум, достаточным для его дальнейшей обработки. Детектор (амплитудный) позволяет получить огибающую сигнала, необходимую для его оцифровки.

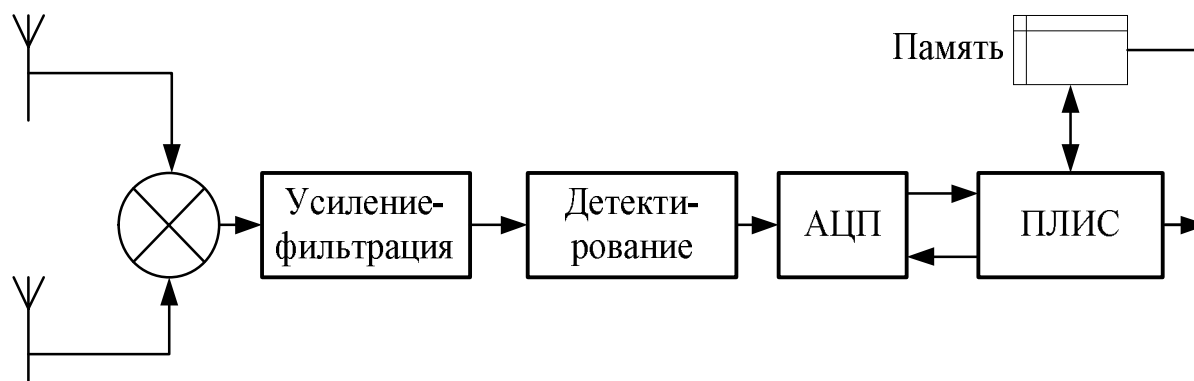


Рис. 2. Архитектура 1 модуля АЗН-В

Fig. 2. Architecture number 1 ADS-B module

Особенностью архитектуры 1 (см. рис. 2) является реализация вычислительной части (собственно дешифрирование) на специализированной параллельно-конвейерной элементной базе – ПЛИС. Аппаратная реализация алгоритмов дешифрирования (язык VHDL или Verilog) позволяет в режиме, близком к реальному времени, выполнить все процедуры дешифрирования, проверки, сохранения и передачи, чтобы получить и передать значения необходимых целевых полей – скорость, координаты и др. [4; 5; 6].

Недостаток архитектуры 1 – высокая зависимость всех процессов обработки от качества предобработки сигнала в приемного тракта. Потери мощности и искажения сигнала (особенно влияют значительные расстояния передачи, возникновение поляризации сигнала и др.) не всегда могут быть компенсированы за счет приема и синхронизации от нескольких антенн и одного каскада предобработки.

Существует вариант архитектуры модуля приема сообщений АЗН-В с усиленной антенной частью и микропрограммным исполнением вычислительной части (рис. 3).

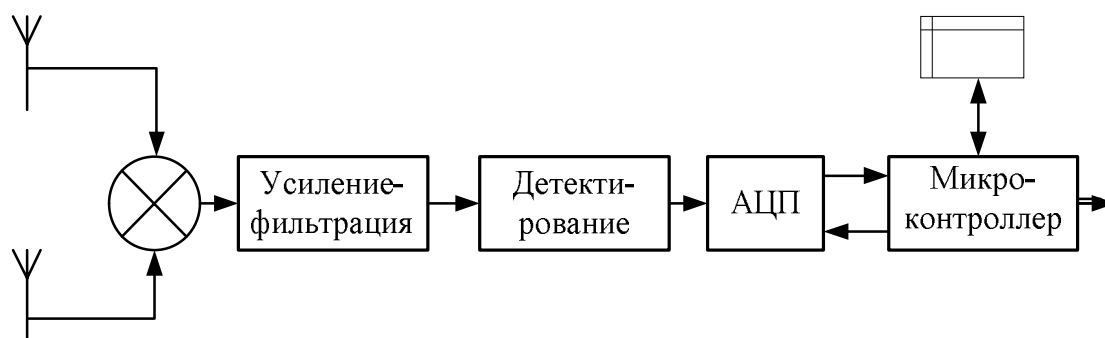


Рис. 3. Архитектура 2 модуля АЗН-В с усиленной антенной частью

Fig. 3. Architecture number 2 of ADS-B module

Микроконтроллер представляет собой специализированный настраиваемый процессор, имеющий встроенную систему команд, включающую микрооперации чтения/записи из внутренних регистров, арифметические и логические операции, а также операции векторной обработки групп бит. В отличие от ПЛИС микроконтроллеры обладают более низким энергопотреблением.

Работа микроконтроллера заключается в:

- настройке режимов работы АЦП (по специализированному интерфейсу);
- записи синхронизированной оцифрованной последовательности из АЦП и

выполнении цикла дешифрования пакета;

- выделении целевых полей данных и их сохранении в энергонезависимую память.

Недостаток архитектуры 2 – последовательная обработка пакета АЗН-В и, как следствие, необходимость буферизации пакетов при их интенсивном поступлении. Одновременное применение микроконтроллера позволяет подключать дополнительные процедуры (но последовательно работающие) для анализа и коррекции бит после АЦП.

Вариант архитектуры электронного модуля приема сообщений АЗН-В с одной антенной показан ниже (рис. 4).



Рис. 4. Архитектура 3 модуля приема сообщений АЗН-В

Fig 4. Architecture number 3 of ADS-B module

Сложная радиообстановка и потенциальная возможность приема сообщений от множества подвижных источников, передающих сигналы не только формата АЗН-В, обуславливают введение многокаскадных схем «усиления-фильтрации», что позволяет за счет ступенчатой обработки и применения фильтров, последовательно понижающих базовую частоту, прийти к удовлетворительному соотношению сигнал/шум.

Рассмотрена двухкаскадная схема преобразования сигнала. В сравнении с однокаскадной схемой она позволяет получить лучшие характеристики по усилению и очистке сигнала при низком напряжении питания, присущем МКА. Потенциально поддерживаемый отечественной элементной базой ряд частот 45МГц – 30МГц – 12МГц – 6МГц полосовых фильтров может дать не удовле-

творительное, а приемлемое соотношение сигнал/шум. Тем не менее массогабаритные ограничения, ограничения по поддерживаемой энергетике солнечными батареями в МКА не позволяют увеличивать длину каскадов.

Недостаток архитектуры – ограничение параллельной обработки пакетов АЗН-В.

Вариант архитектуры электронного модуля приема сообщений АЗН-В с одной антенной на базе ПЛИС показан ниже (рис. 5).



Рис. 5. Архитектура 4 модуля приема сообщений АЗН-В

Fig. 5. Architecture number 4 of ADS-B module

Архитектура поддерживает двухкаскадную схему приема, предобработки и дешифрирования пакета АЗН-В с возможностью параллельного исполнения алгоритмов разбора полей на ПЛИС за счет тиражирования независимых вычислительных блоков/узлов частных операций и синхронизации их работы при необходимости. Архитектура поддерживает оперативную (пере)-настройку АЦП, селекции полей и др.

Существует несколько вариантов построения приемного тракта системы АЗН-В. Критерии оценки вариантов построения следующие:

- процент использования российской элементной базы;
- общее потребление, чувствительность приема маломощных сигналов;
- использование напряжений питания не более до 3,7 В.

Для исследования и выбора структуры приемного тракта системы АЗН-В рассматриваются следующие структурные схемы, приведённые на рисунках 6-8.

Структура на рисунке 6 имеет двухкаскадную организацию, что позволяет управлять уровнем шума

На рисунке 7 приведена другая структурная схема макета приемного тракта (вариант 2).

Отличие варианта 2 в том, что вместо двух малошумящих усилителей используется один малошумящий усилитель, интегрирующий в себе процессы усиления и фильтрации.

На рисунке 8 приведена еще одна структурная схема макета приемного тракта (вариант 3).

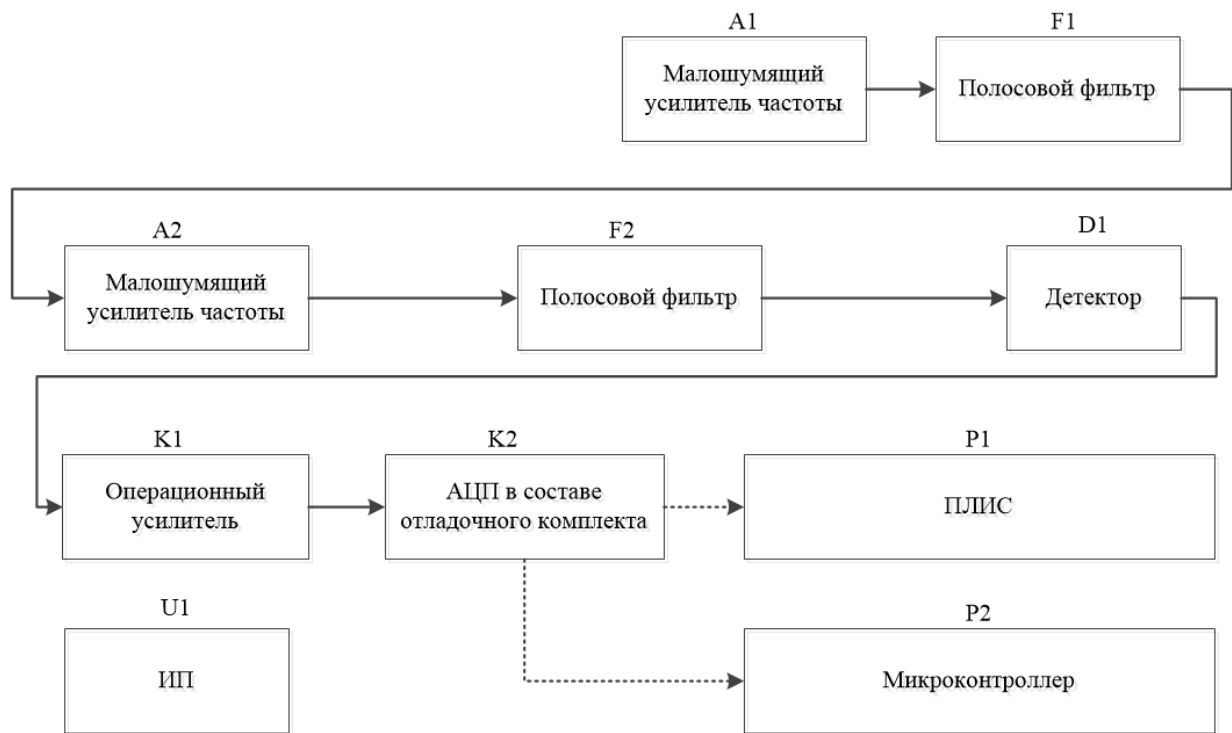


Рис. 6. Структурная схема приемного тракта модуля АЗН-В (вариант 1)

Fig. 6. Structure diagram of the receiving part of the ADS-B module (option 1)

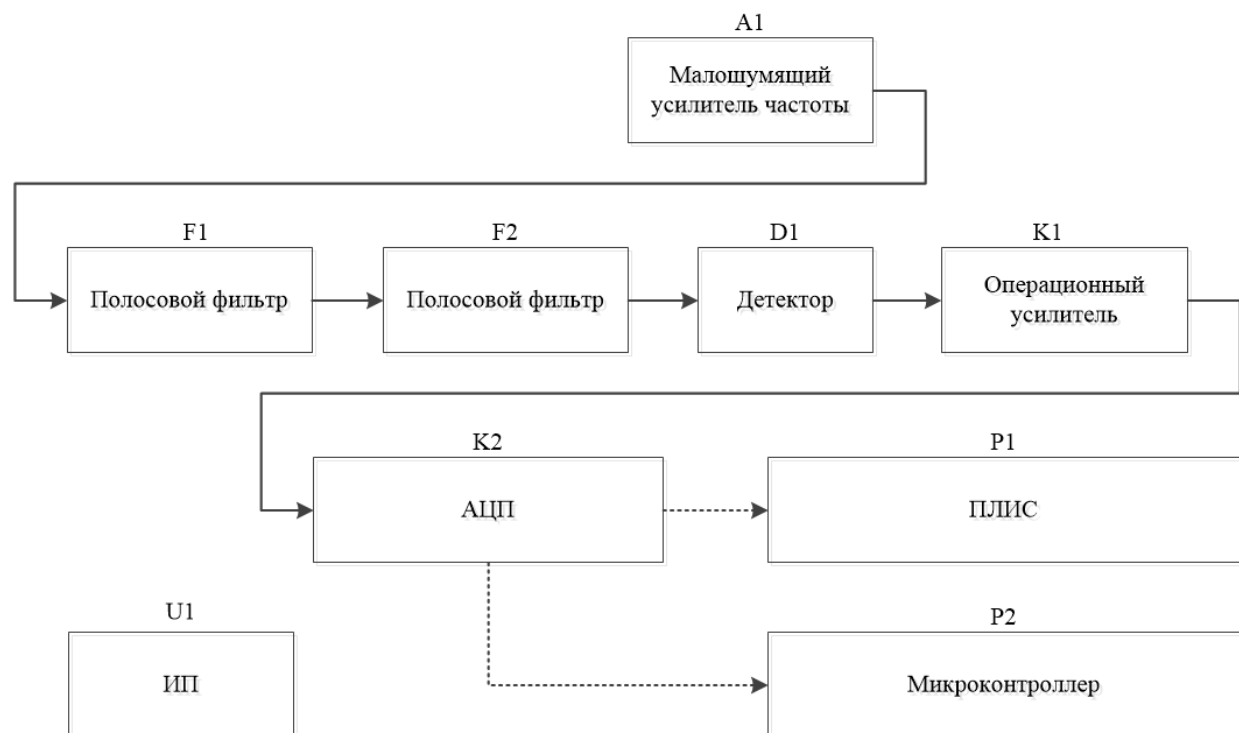


Рис. 7. Структурная схема макета приемного тракта (вариант 2)

Fig. 7. Structure diagram of the receiving part of the ADS-B module (option 2)

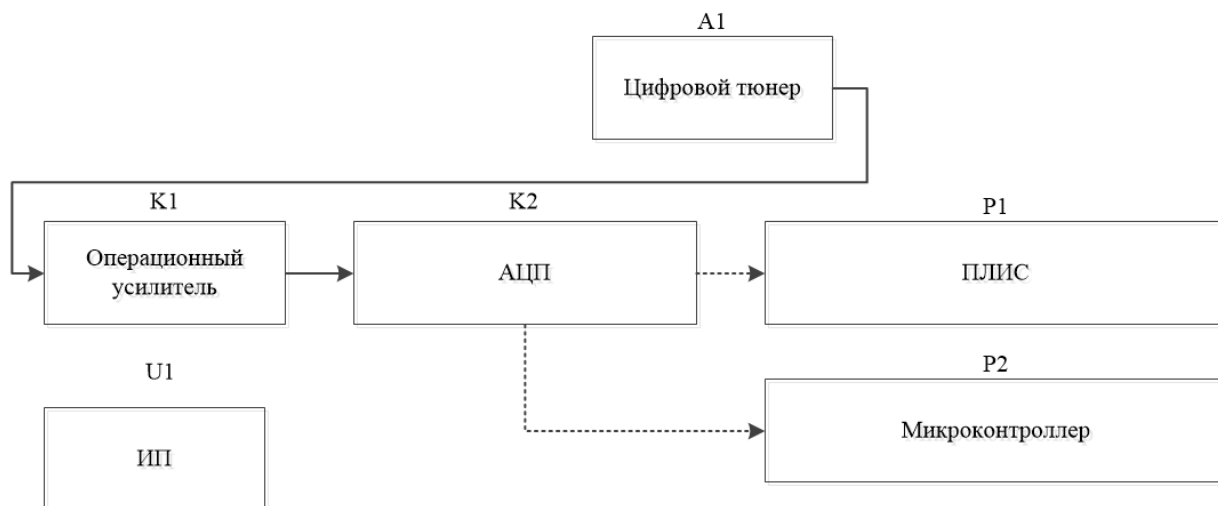


Рис. 8. Структурная схема макета приемного тракта (вариант 3)

Fig. 8. Structure diagram of the receiving part of the ADS-B module (option 3)

Особенность данной схемы в том, что в ней не используются отдельные усилители, фильтры и детектор, а вместо этого используется цифровой тюнер. Цифровой тюнер выполняет усиление, перенос частоты и фильтрацию сигналов, таким образом на выходе получается огибающая сигнала.

Результаты и их обсуждение

Для окончательного выбора варианта приемного тракта модуля обработки сообщений АЗН-В выполнены расчеты коэффициентов усиления, шума и потребления.

Для варианта 1 приемного тракта электронного модуля АЗН-В (см. рис. 6) расчет характеристик показан ниже (табл. 1).

Уровень теплового шума в полосе 6 МГц при температуре 273К и нагрузке 50 Ом будет -83,5 дБм. С учетом коэффициента шума в полосе 6 МГц анализируемый приемный тракт позволит обнаруживать сигналы с уровнем выше -81,3 дБм.

Для варианта 2 приемного тракта электронного модуля АЗН-В (см. рис. 7) расчет характеристик показан ниже (табл. 2).

Уровень теплового шума в полосе 6 МГц при температуре 273К и нагрузке 50 Ом будет -83,5 дБм. С учетом коэффициента шума в полосе 6 МГц анализируемый приемный тракт позволит обнаруживать сигналы с уровнем выше -82,0 дБм. Однако такой вариант не подходит по напряжению питания и потреблению, которое значительно превышает 1 Вт.

Таблица 1. Расчет характеристик приемного тракта (вариант 1)**Table 1.** Calculation of the indicators of the receiving device (option 1)

Наименование устройства	Коэффициент усиления/потерь, дБ	Коэффициент шума, дБ	Потребляемая мощность, мВт	Напряжение, В
1. Усилитель	15,1	1,1	13,0	2,7 – 5,5
2. Полосовой фильтр	-2,3	0	0	0
3. Усилитель	15,1	1,1	13,0	2,7 – 5,5
4. Полосовой фильтр	-2,5	0	0	0
5. СВЧ-соединения	-2,5	0	0	0
6. Детектор	-	-	50,7	3,3 – 5,5
7. Операционный усилитель	-	-	40,0	2,7 – 5,5
8. АЦП	-	-	153,0	1,7 – 1,9
9. ПЛИС	-	-	3 940	1,2 ±0,05
10. Весь тракт	22,9	2,2	269,7	14,3

Таблица 2. Расчет характеристик приемного тракта (вариант 2)**Table 2.** Calculation of the indicators of the receiving device (option 2)

Наименование устройства	Коэффициент усиления / потерь, дБ	Коэффициент шума, дБ	Потребляемая мощность, мВт	Напряжение, В
1. Усилитель	35	1,5	1080	8 – 12
2. Полосовой фильтр	-2,3	0	0	0
3. Полосовой фильтр	-2,5	0	0	0
4. СВЧ-соединения	-2,0	0	0	0
5. Детектор	-	-	50,7	2,7 – 5,5
6. Операционный усилитель	-	-	40,0	2,7 – 5,5
7. АЦП	-	-	153,0	1,7 – 1,9
8. ПЛИС	-	-	3 940	1,2 ±0,05
9. Весь тракт	28,2	1,5	269,7	16,3

Расчет коэффициента усиления, коэффициента шума приемного тракта и потребления в соответствии с вариантом

3 приемного тракта электронного модуля АЗН-В (см. рис. 8) приведен в таблице 3.

Таблица 3. Расчет характеристик приемного тракта (вариант 3)

Table 3. Calculation of the indicators of the receiving device (option 3)

Наименование устройства	Коэффициент усиления / потерь, дБ	Коэффициент шума, дБ	Потребляемая мощность, мВт	Напряжение, В
1. Цифровой тюнер	85	3,5	587,4	3 – 3,6
2. СВЧ соединения	-1,0	0	0	0
3. Операционный усилитель	-	-	40,0	2,7 – 5,5
4. АЦП	-	-	153,0	1,7 – 1,9
5. ПЛИС	-	-	3 940	1,2 ±0,05
6. Весь тракт	84	3,5	780,4	8,6

Уровень теплового шума в полосе 6 МГц при температуре 273К и нагрузке 50 Ом будет -83,5 дБм. С учетом коэффициента шума в полосе 6 МГц анализируемый приемный тракт позволит обнаруживать сигналы с уровнем выше -80,0 дБм.

Оценка приведенного варианта: использование 3 из 5 компонент российской элементной базы, общее потребление 780,4 мВт без учета потребления ПЛИС, чувствительность приемного тракта от -80,0 дБм, напряжения питания элементов не превышают 3,7 В.

Таким образом, вариант 3 имеет большее максимальное потребление, однако в цифровом тюнере надо уменьшить коэффициент усиления для увели-

чения полезного динамического диапазона АЦП, что также приведет к уменьшению потребляемой мощности. Чувствительность варианта 3 хуже на 2 дБ, но в нем меньше компонентов и соединений, что повышает надежность схемы и снижает вероятность ухудшения характеристик приемного тракта за счет нарушения соединений. В связи с этим лучшим (по коэффициенту усиления) является вариант 1, а наиболее надежным (по уровню рабочего напряжения) из подходящих – вариант 3.

Выводы

1. Выполненный анализ вариантов архитектуры модуля позволил детализировать структурную организацию электронного модуля приема сообщений,

включающую блоки приема, предобработки и дешифрирования сообщений АЗН-В, что позволило определиться к электронной компонентной базой и проработать технические решения подсистем и элементов модуля приема, включая антенну, приемник сигнала и обработчик-дешифратор сообщений АЗН-В.

2. Исследование вариантов схемы приемного тракта электронного модуля приема сообщений АЗН-В продемонстрировало, что лучшим (по коэффици-

енту усиления) является вариант с последовательной двухкаскадной частью «усиление-фильтрация», а наиболее надежным (по уровню рабочего напряжения) является вариант с интегральной микросхемой обработки сигнала. Полученные варианты позволяют детализировать архитектуру модуля и структуру его приемного тракта в зависимости от выбранных целевых показателей (коэффициенты усиления, отношения сигнал/шум, мощности потребления).

Список литературы

1. Миленин Д. В., Олейников Е. П. Современное состояние и перспективы развития малых космических аппаратов // Решетневский чтения: материалы XXIII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева: в 2 ч. / под ред. Ю. Ю. Логинова; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2019. С. 410–411.
2. Development of a method to determine the location of a nanosatellite using ADS-B / S. Frolov, O. Chadrina, E. Titenko, A. Shitov, Kh. Andrey, T. Dmitry // Revista Tecnica de la Facultad de Ingenieria Universidad del Zulia. 2020. Vol. 43, N S1. P. 48–55.
3. Автономная интеллектуальная группировка малых космических аппаратов – космический эксперимент «Радиоскаф-5» / О. И. Атакищев, Е. А. Шиленков, С. Н. Фролов, Е. А. Титенко, А. Н. Щитов, Д. М. Зарубин // Известия Института инженерной физики. 2020. № 1 (55). С. 42–48.
4. Структурная схема модуля определения местоположения малых космических аппаратов / Е. А. Титенко, А. С. Сизов, А. Н. Щитов, А. Н. Шевцов, Е. Н. Щитова, Е. В. Скрипкина // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15, № 4. С. 28–34.
5. Мальцев Г. Н., Козинков И. А., Фатеев В. Ф. Методы выбора наиболее информативных спектральных каналов при дистанционном зондировании Земли с малых космических аппаратов // Известия вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 6. С. 23–31.
6. Щитов А. Н., Титенко Е. А., Сизов А. С. Модель вычисления координат малого космического аппарата на основе датчиков подвижных объектов // Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции: сборник материалов III Международного форума / под редакцией В. И. Сырямкина. Томск, 2020. С. 53–57.

7. Дуга В. В., Мосин Д. А., Полехин А. А. К вопросу о развитии направления малых космических аппаратов // *Авиакосмическое приборостроение*. 2020. № 10. С. 26-33.
8. Результаты проведения 5 этапа космического эксперимента «Радиоскаф» / С. Н. Самбуров, О. Г. Артемьев, Е. А. Шиленков, С. Н. Фролов, Е. А. Титенко, А. Н. Щитов // *Пятьдесят пятые научные чтения памяти К. Э. Циолковского*. Калуга, 2020. С. 192–196.
9. Книжников Ю. Ф., Кравцова В. И., Тутубалина О. В. *Аэрокосмические методы географических исследований*. М.: Академия, 2004. 182 с.
10. Математическая модель определения местоположения наноспутника формата cubesat / Е. А. Титенко, С. Н. Фролов, А. Н. Щитов, Е. Н. Щитова // *Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей IV Всероссийской науч.-практ. конф.* / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2020. С. 107-112.
11. Mathematical model of the earth's magnetic anomalies / Freire Carrera F., E. Shilenkov, Titenko E., Frolov S., Shitov A. // *Revista Tecnica de la Facultad de Ingenieria Universidad del Zulia*. 2020. Vol. 43, N S1. P. 35-39.
12. Специфика реализаций комплексов управления на базе технологии LORAWAN / В. Г. Довбня, С. Н. Фролов, К. П. Сулима, А. Н. Щитов // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2020. Т. 14, № 9. С. 24-30.
13. Медова Л. Р., Рыбин П. С., Филатов И. В. Об одной системе связи для малых космических аппаратов нанокласса // *Информационные процессы*. 2018. Т. 18, № 1. С. 72-79.
14. Borzov D. B., Masyukov I. I., Titenko E. A. Methods of critical systems reconfiguration // *2018 International Russian Automation Conference. RusAutoCon 2018*. Sochi: IEEE, 2018. P. 8501613.
15. Модель и алгоритм вычисления координат летальных аппаратов на основе датчиков местоположения / А. И. Захаренков, Д. П. Тетерин, О. Г. Добросердов, Е. А. Титенко, С. Н. Фролов, А. Н. Щитов, Г. И. Передельский // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2019. Т. 9, № 4 (33). С. 163-180.
16. Мухин И. Е., Шиленков Е. А. Метод параметрического синтеза антенно-фидерных, радиоприёмных и демодуляторных средств сигнально-приёмного тракта современных систем телекоммуникаций // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2012. № 2-3. С. 110-115.

17. Широкополосные многочастотные сигнально-кодовые конструкции для передачи информации через ионосферный канал / К. А. Воробьев, И. С. Косилов, Е. М. Лобов, Е. А. Шиленков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2–3. С. 41-46.
18. Методика обоснования параметров орбиты и характеристик двигательной установки малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли / А. А. Абдурахимов, А. В. Левадович, Д. А. Мосин, А. В. Северенков // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11, № 2. С. 73-86.
19. Леонидов Н. В., Митина М. В. Образ низкоорбитального дополнения к орбитальной группировке системы ГЛОНАСС // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2 (36). С. 66-70.
20. Голяков А. Д., Ричняк А. М. Точность автономной навигации взаимным методом при групповом полёте малых космических аппаратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 2. С. 47-57.

References

1. Milenin D. V., Oleinikov E. P. [The new state and prospects for the development of small spacecraft]. Reshetnevskii chteniya. Materialy XXIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M. F. Reshetneva [Reshetnevsky readings. Materials of the XXIII International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of the general designer of rocket and space systems Academician M. F. Reshetnev]; ed. By Yu. Yu. Loginova. Krasnoyarsk, Sibirskii gosudarstvennyi universitet nauki i tekhnologii imeni akademika M. F. Reshetneva Publ., 2019, pp. 410-411. (In Russ.)
2. Frolov S., Chadrina O., Titenko E., Shitov A., Andrey Kh., Dmitry T. Development of a method to determine the location of a nanosatellite using ADS-B. *Revista Tecnica de la Facultad de Ingenieria Universidad del Zulia*, 2020, vol. 43, no. S1, pp. 48-55.
3. Atakishchev O. I., Shilenkov E. A., Frolov S. N., Titenko E. A., Shchitov A. N., Zarubin D. M. Avtonomnaya intellektual'naya gruppirovka malykh kosmicheskikh apparatov – kosmicheskii eksperiment "Radioskaf-5" [Autonomous intelligent constellation of small spacecraft - space experiment "Radioskaf-5"]. *Izvestiya Instituta inzhenernoi fiziki = Proceedings of the Institute of Engineering Physics*, 2020, no. 1 (55), pp. 42-48.

4. Shilenkov E. A., Frolov S. N., Zarubin D. M., Gorbunov A. A., Dobroserdov D. G., Shchitov A. N., Titenko E. A., Silchenko R. Strukturnaya skhema modulya opredeleniya mestopolozheniya malykh kosmi-cheskikh apparatov [The block diagram of the module to determine the location of small spacecraft]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport = T-Comm: Telecommunications and Transport*, 2021, vol. 15, no. 4, pp. 28-34.

5. Maltsev G. N., Kozinov I. A., Fateev V. F. Metody vybora naibolee in-formativnykh spektral'nykh kanalov pri distantsionnom zondirovanii Zemli s malykh kosmicheskikh apparatov [Methods for selecting the most informative spectral channels for remote sensing of the Earth from small spacecraft]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie = News Universities. Instrumentation*, 2007, vol. 50, no. 6, pp. 23-31.

6. Shchitov A. N., Titenko E. A., Sizov A. S. [Model for calculating the coordinates of a small spacecraft based on sensors of moving objects]. *Intellektual'nye sistemy 4-i promyshlennoi revolyutsii. Sbornik materialov III Mezhdunarodnogo foruma [Intelligent systems of the 4th industrial revolution. Collection of materials of the III International Forum]*; ed. by V. I. Syryamkina. Tomsk, 2020, pp. 53-57. (In Russ.)

7. Duga V. V., Mosin D. A., Polekhin A. A. K voprosu o razvitii napravleniya malykh kosmicheskikh apparatov [On the development of the direction of small spacecraft]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie = Aviation and Space Instrument Engineering*. 2020, no. 10, pp. 26-33.

8. Samburov S. N., Artemiev O. G., Shilenkov E. A., Frolov S. N., Titenko E. A., Shchitov A. N. [The results of the 5th stage of the "Radioscap" space experiment]. *Pyat'desyat pyatye Nauchnykh chtenii pamyati K. E. Tsiolkovskogo [Fifty-fifth scientific readings in memory of K. E. Tsiolkovsky]*. Kaluga, 2020, pp. 192-196. (In Russ.)

9. Knizhnikov Yu. F., Kravtsova V. I., Tutubalina O. V. Aerospace methods of geographical research [Aerospace methods of geographical research]. Moscow, Academy Publ., 2004. 182 p.

10. Titenko E. A., Frolov S. N., Shchitov A. N., Shchitova E. N. [Mathematical model for determining the location of a cubesat nanosatellite]. *Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Sbornik nauchnykh statei IV Vserossiiskoi nauch.-prakt. konf. [Infocommunications and space technologies: status, problems and solutions. Collection of scientific articles of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference]*. Kursk, Southwest State University Publ., 2020, pp. 107-112. (In Russ.)

11. Freire Carrera F., Shilenkov E., Titenko E., Frolov S., Shitov A. Mathematical model of the earth's magnetic anomalies. *Revista Tecnica de la Facultad de Ingenieria Universidad del Zulia*, 2020, vol. 43, no. S1, pp. 35-39.

12. Dovbnya V. G., Frolov S. N., Sulima K. P., Shchitov A. N. Spetsifika realizatsii kompleksov upravleniya na baze tekhnologii LORAWAN [Specificity of realizations of control complexes based on LORAWAN technology]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport = T-Comm: Telecommunications and Transport*, 2020, vol. 14, no. 9, pp. 24-30.
13. Medova L. R., Rybin P. S., Filatov I. V. Ob odnoi sisteme svyazi dlya malых kosmicheskikh apparatov nanoklassa [On one communication system for small nanoclass spacecraft]. *Informatsionnye protsessy = Information Processes*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 72-79.
14. Borzov D. B., Masyukov I. I., Titenko E. A. Methods of critical systems reconfiguration. 2018 International Russian Automation Conference. RusAutoCon 2018. Sochi, IEEE, 2018, p. 8501613.
15. Zakharenkov A. I., Teterin D. P., Dobroserdov O. G., Titenko E. A., Frolov S. N., Shchitov A. N., Peredelsky G. I. Model' i algoritm vychisleniya koordinat letal'nykh apparatov na osno-ve datchikov mestopolozheniya [Model and Algorithm for Calculating the Coordinates of Flying Vehicles Based on Location Sensors]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, vol. 9, no. 4 (33), pp. 163-180.
16. Mukhin I. E., Shilenkov E. A. Metod parametricheskogo sinteza antenno-fidernykh, radiopriemnykh i demodulyatornykh sredstv signal'no-priemnogo trakta sovremennykh sistem telekommunikatsii [Method of parametric synthesis of antenna-feeder, radio-receiving and demodulator means of signal-receiving path of modern telecommunication 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*, 2012, no. 2-3, pp. 110-115.
17. Vorobiev K. A., Kosilov I. S., Lobov E. M., Shilenkov E. A. Shirokopolosnye mnogochastotnye signal'no-kodovye konstruksii dlya peredachi informatsii cherez ionosfernyi kana [Broadband multifrequency signal-code constructions for transmitting information through the ionospheric channel]. *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*, 2012, no. 2-3, pp. 41-46.
18. Abdurakhimov A. A., Levadovich A. V., Mosin D. A., Severenkov A. V. Metodika obosnovaniya parametrov orbity i kharakteristik dvigatel'noi ustanovki malogo kosmich-

eskogo apparata dstantsionnogo zondirovaniya Zemli ovaniyakh [The method of substantiating the orbit parameters and characteristics of the propulsion system of a small spacecraft for remote sensing of the Earth]. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issled = Science-Intensive Technologies in Space Research of the Earth*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 73-86.

19. Leonidov N. V., Mitina M. V. Obraz nizkoorbital'nogo dopolneniya k orbital'noi gruppirovke sistemy GLONASS [An image of a low-orbit addition to the orbital constellation of the GLONASS system]. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Control. Diagnostics*, 2021, no. 2 (36), pp. 66-70.

20. Golyakov A. D., Richnyak A. M. Tochnost' avtonomnoi navigatsii vzaimnym metodom pri gruppovom polete malykh kosmicheskikh apparatov [Accuracy of autonomous navigation by mutual method in group flight of small spacecraft]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie = Bulletin of Samara University. Aerospace Engineering, Technology and Mechanical Engineering*, 2018, vol. 17, no. 2, pp. 47-57.

Информация об авторах / Information about the Authors

Титенко Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: johntit@mail.ru

Evgeny A. Titenko, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: johntit@mail.ru

Щитов Алексей Николаевич, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: se_vv@bk.ru

Alexey N. Shchitov, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: se_vv@bk.ru

Локтионов Аскольд Петрович, доктор технических наук, член диссертационного совета Д212.105.02, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: loapa@mail.ru

Askold P. Loktionov, Dr. of Sci. (Engineering), Member of the Dissertation Council D212.105.02, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, г. Курск, e-mail: loapa@mail.ru

Архипов Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alex.76_09@mail.ru

Alexander E. Arkhipov, Cand. of Sci. (Engineering), Leading Researcher, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: alex.76_09@mail.ru

Шиянов Борис Анатольевич, доктор
технических наук, первый проректор,
Международный институт компьютерных
технологий, г. Воронеж, Российская Федерация,
e-mail: shyanov.b@mail.ru

Boris A. Shiyanov, Dr. of Sci. (Engineering),
First Vice-Rector, International Institute
of Computer Technologies, Voronezh,
Russian Federation,
e-mail: shyanov.b@mail.ru

Яшин Алексей Геннадьевич, главный
конструктор специальных проектов,
АО «Авиаавтоматика» им. В. В. Тарасова,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: yashinag@mail.ru

Aleksey G. Yashin, Chief Designer of Special
Projects, "Aviaavtomatika" named after
V. V. Tarasov JSC, Kursk, Russian Federation,
e-mail: yashinag@mail.ru

УДК 378.147

Дискуссия как педагогическая технология развития soft skills будущих IT-специалистов

Р. А. Томакова¹ ✉, М. В. Томаков¹

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

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Резюме

Целью исследования является использование потенциальных дидактических возможностей дискуссии как педагогической технологии развития soft skills будущих IT-специалистов.

Методы исследования основываются на компетентностном, контекстном и интегративном подходе в образовании. Использовались традиционные для теоретико-прикладных исследований методы: анализ, синтез, педагогическое наблюдение, систематизация фактов.

Материалом настоящего исследования послужили научные работы, исследующие практические вопросы подготовки будущих IT-специалистов в вузах, а также собственный опыт организации и проведения дискуссий по итогам практик, предусмотренных образовательной программой направления подготовки «Программная инженерия».

Результаты. Актуальность исследования определена необходимостью совершенствования образовательного процесса на основе широкого использования интерактивных технологий в высшем профессиональном образовании для подготовки IT-специалистов качественно нового уровня, конкурентных и востребованных на рынке труда в условиях развития цифровой экономики.

Опыт организации и проведения дискуссий по итогам практик доказал, что дискуссия обладает большими возможностями в профессиональном обучении и развитии soft skills будущих IT-специалистов, поскольку создает участнику дискуссии ситуации и условия для формирования, развития и закрепления личных качеств, обеспечивает проявление индивидуальности и активное включение студентов в поиск и доказательство истины. Дискуссия учит их мыслить критически, управлять своими эмоциями, работать в команде и не бояться высказывать свое мнение.

Заключение. Дискуссию следует рассматривать как педагогическую технологию интерактивного обучения, применение которой активизирует их коммуникативные возможности студента и стимулирует развитие soft skills. В совокупности с другими педагогическими технологиями дискуссия предоставляет возможность подготовить IT-специалиста, обладающего soft skills и конкурентного на рынке труда.

Ключевые слова: высшее образование; педагогическая технология; дискуссия; подготовка IT-специалистов; личные качества; soft skills.

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

Для цитирования: Томакова Р. А., Томаков М. В. Дискуссия как педагогическая технология развития soft skills будущих IT-специалистов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 3. С. 121–141.

Поступила в редакцию 18.07.2021

Подписана в печать 11.08.2021

Опубликована 30.09.2021

Discussion As a Pedagogical Technology for the Development of Soft Skills of Future IT Specialists

Rimma A. Tomakova¹✉, Maxim V. Tomakov¹

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 use the potential didactic possibilities of discussion as a pedagogical technology for the development of soft skills of future IT specialists.

The research methods is based on the competence-based, contextual and integrative approach in education. We used traditional methods for theoretical and applied research – analysis, synthesis, pedagogical observation, systematization of facts.

The material of this research is scientific works that explore practical issues of training future IT specialists in universities, as well as our own experience in organizing and conducting discussions on the results of practices provided for in the educational program of the "Software Engineering" direction.

Results. The relevance of the study is determined by the need to improve the educational process based on the widespread use of interactive technologies in higher professional education for training specialists of a qualitatively new level in the context of the development of the digital economy. These specialists must be competitive and in demand in the labor market, be able to solve problems in a rapidly changing situation.

The experience of organizing and conducting discussions based on the results of practical training has proved that the discussion has great opportunities for professional training and development of soft skills of future IT specialists, since it creates situations and conditions for the discussion participant to form, develop and consolidate personal qualities, ensures the manifestation of individuality and active involvement of students in the search and proof of truth.

Conclusions. Discussion is possible only in the implementation of preliminary theoretical and practical training of students on the problem under consideration. As a pedagogical technology of interactive learning, it will ensure success only when analyzing problems for which there is no unambiguous solution, which require active joint discussion, have a personally and professionally significant character for the participant. A significant success factor is the willingness of the practice manager, experts and students to discuss, who are obliged to responsibly accept the rules of interaction before the discussion and observe them by each participant during the discussion, to have a culture of dispute management, adequate self-esteem, openness of thinking, breadth of creative imagination, tolerance.

Keywords: higher education; pedagogical technology; discussion; training of IT specialists; personal qualities; soft skills.

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

For citation: Tomakova R. A., Tomakov M. V. Discussion as a Pedagogical Technology for the Development of Soft Skills of Future IT Specialists. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2021; 11(3): 121–141. (In Russ.)

Received 18.07.2021

Accepted 11.08.2021

Published 30.09.2021

Введение

В настоящее время происходит цифровизация всех отраслей экономики, и сфера IT-технологий стремительно развивается. На рынке труда углубился дефицит системных аналитиков, SRE-инженеров. Site Reliability Engineer – специалист, отвечающий за надежность, масштабируемость и бесперебойную работу IT-систем. SRE работает в пограничной области между DevOps и разработкой. Сейчас вакансии SRE открываются в IT-компаниях разной величины и направления деятельности. DevOps-инженеры контролируют все этапы создания программного продукта: от написания кода до официального релиза. Помогают отделам разработки и администрирования, синхронизируют их усилия и автоматизируют технические процессы. За два года спрос на этих специалистов вырос на 70%. Резко вырос спрос на специалистов в области информационной безопасности и Data Scientist (дата-сайентисты занимаются анализом больших массивов данных – big data). Всегда нужны специалисты C++, разработчики мобильных платформ. IT-сфера – это комплексная отрасль: если рынку требуется больше разработчиков программного продукта, то растет спрос и на те-

стировщиков. Сейчас по всем направлениям усиливается дефицит IT-специалистов. Самое интенсивное направление среди всех IT-специальностей в этом контексте – big data. Специалисты в этой области нужны везде.

В этой связи востребованность специалистов IT-сферы в настоящее время ни у кого не вызывает сомнений. Проблема подготовки качественных IT-специалистов стала особенно актуальной, что отражено в Концепции модернизации высшего образования под запросы цифровой экономики, официально изложенной в руководящих документах Правительства Российской Федерации. Ученые и практики, педагогическое сообщество придают большое значение решению указанной проблемы и работают в данном направлении.

После окончания университета выпускник должен обладать определенными профессиональными навыками, которые необходимы для выполнения конкретной формализованной работы в сфере IT-технологий и процессов. В их число входят профессиональные теоретические знания и практические навыки и опыт в конкретной профессиональной области деятельности IT-специалиста, которые необходимы для эффективной

его работы. По своей сути это профессиональные компетенции, или *hard skills* («жесткие навыки»).

В то же время IT-специалистам следует соответствовать определённым современным требованиям, без которых они не смогут успешно справляться со своими профессиональными задачами. Для этого они должны иметь не только профессиональные компетенции (*hard skills*), но и определённые личные качества, жёстко непривязанные к определённой профессиональной или социальной группе, а распространённые среди всех слоёв общества. В профессиональной среде их именуют «мягкие навыки», или *soft skills*.

Определённой однозначной трактовки термина *soft skills* на сегодняшний день нет. Подробный на основе исследования множества научных источников отечественных и зарубежных исследователей контент-анализ дефиниции *soft skills* был выполнен авторами работы [1]. По своей сути *soft skills* – надпрофессиональные компетенции, которые помогают решать жизненные задачи и работать с другими людьми. Независимо от специальности необходимо обладать хотя бы несколькими «мягкими навыками» [2; 3]. Эти навыки дают возможность их обладателю взаимодействовать с другими людьми согласованно и, как правило, результативно.

Принято считать, что программистам особо не нужны *soft skills*. Однако в создание и развитие IT-продуктов вовлечены несколько команд в компании,

включая маркетинг и отдел продаж. Хороший разработчик программного продукта обязан обладать определённым предрасположением к той работе, которую он выполняет. Для достижения эффективных результатов ему необходимо уметь задавать вопросы, чётко формулировать мысли, слушать и слышать собеседника, аргументированно и при этом простыми словами доносить свою точку зрения и принимать чужую – договариваться, одним словом.

Сотрудник современных IT-компаний, организаций должен ориентироваться на интересы будущих потребителей и быть готовым к прямому диалогу с заказчиками IT-продукта и услуг IT-сферы. Поэтому ему должны быть присущи такие качества, как коммуникабельность, устойчивость к стрессам, умение организовать команду и работать в команде, командной работе, умение планировать работу, желание к самообучению и др. навыки, позволяющие эффективно работать.

В *soft skills* входят такие личные навыки, как умение системно мыслить, управлять своими эмоциями, рационально распоряжаться своим временем, результативно взаимодействовать с коллегами и работать в команде.

В *soft skills* входят также общая осведомлённость об окружающем мире, способность и готовность проявлять лидерские качества, умение убеждать, позитивный настрой на работу и др. личные качества, которые помогают быстро находить общий язык с окружающими, устанавливать и поддерживать деловые

связи, успешно доносить свои идеи окружающим, т. е. быть хорошим коммуникатором.

Эксперты имеют разное мнение по поводу того, какие мягкие навыки полагать наиболее ценными в современных условиях. По опросам работодателей в списке крайне востребованных soft skills наиболее часто встречаются такие: умение адаптироваться к окружающей ситуации, действовать в условиях частичной неопределенности; способность к эффективной коммуникации в разных форматах и на различных уровнях; самоорганизация; аналитические способности; навык командной работы.

С точки зрения личной эффективности высоко оцениваются такие способности, как самостоятельно учиться, управлять своими эмоциями, самостоятельно принимать решения и устанавливать межличностные связи.

Хорошо сформированные soft skills дают выпускнику вуза определенные преимущества перед другими кандидатами при приеме на работу, поскольку с каждым годом роль мягких навыков для успешного развития IT-компаний возрастает.

Тот факт, что индивидуальные качества человека в деловой среде ценятся все выше, подтверждают многочисленные опросы, выполненные среди сотрудников по найму. Так, около 92% респондентов LinkedIn («Линкед-Ин» – международная социальная сеть, предназначена только для поиска работы и сотрудников, обмена опытом и налаживания деловых связей) из 35 стран приравнили

по своей значимости soft skills к профессиональной экспертизе. Сделанное заключение, которое распространяется на все сферы экономики и управления, справедливо для социальной сферы и обслуживания. Согласно опросу Международной консалтинговой компании McKinsey & Company [4], на сегодняшний день IT-специалисты, обладающие soft skills, больше всего востребованы именно в высокотехнологичных отраслях, в которых наблюдается высокий уровень внедрения автоматизации и искусственного интеллекта, что демонстрирует рисунок 1. Из этих данных следует, что в настоящее время soft skills должен обладать классический IT-специалист.

Третья часть респондентов из числа опрошенных указала, что самыми проблемными с точки зрения «мягких навыков» IT-сферами в 2021 г. будут *data analytics, IT, mobile, web-design* [4].

Зависимость между «гибкими» навыками и продуктивностью в IT-сфере объясняется рядом факторов, один из них – быстрая смена трендов в индустрии. Многие технологии в IT-сфере быстро проходят через кривую хайпа (Hype Cycle): вначале на пике интереса и востребованности одни, а через некоторое время – уже другие. Большинство IT-технологий неизбежно будут проходить стадии хайпа. Цикл зрелости прорывных технологий по отраслям наглядно демонстрирует ежегодно публикуемый Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies (рис. 2). [5]

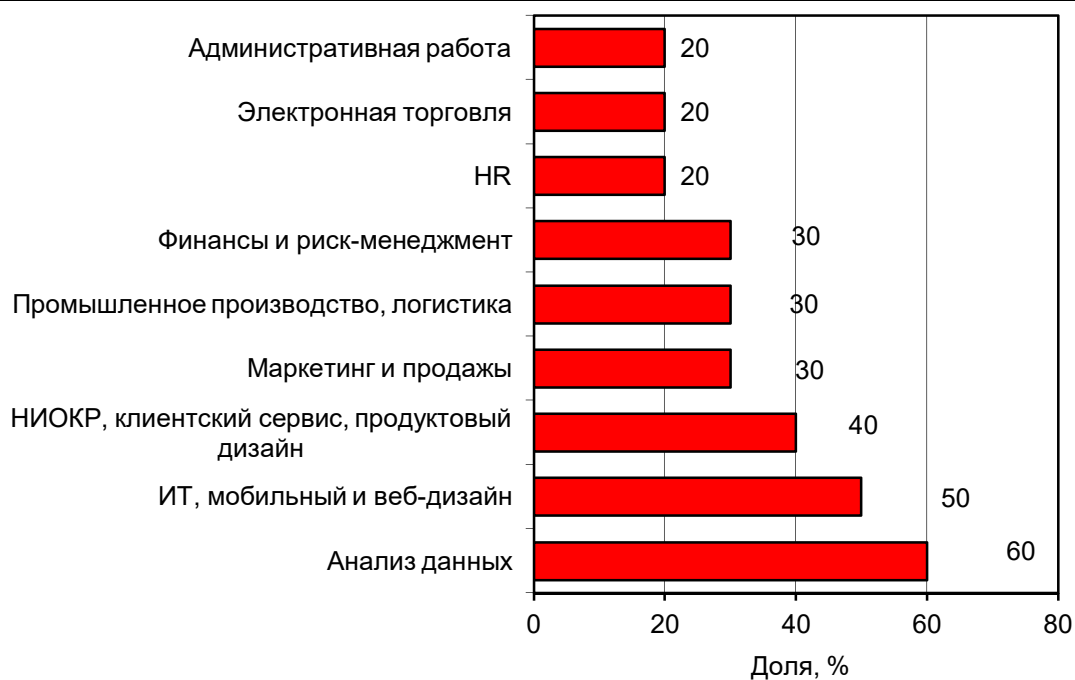


Рис. 1. Уровень внедрения автоматизации и искусственного интеллекта в высокотехнологичные отрасли (данные McKinsey & Company)

Fig. 1. The level of implementation of automation and artificial intelligence in high-tech industries (data from McKinsey & Company)



Рис. 2. Оценка цифровой зрелости по отраслям в целом

Fig. 2. Assessment of digital maturity by industry as a whole

Поскольку IT-индустрия (код, платформы) постоянно развивается, проектная работа требует гибкости мышления и разработчики должны подстраиваться под меняющуюся реальность. Для этого они должны обладать профессиональной компетентностью и soft skills.

Значимость soft skills для российского IT-специалиста подтверждается современными исследователями, которые отмечают возросший интерес российских работодателей к «мягким навыкам» сотрудника, что можно объяснить отставанием цифровой зрелости отраслей экономики России от уровня мировых показателей, что может иметь решающее значение в конкурентной борьбе и необходимостью цифровизации отраслей экономики и развитием информационных технологий. Руководители различных компаний, организаций, фирм при приеме на работу отдают предпочтение всесторонне развитым кандидатам, обладающим широким набором soft skills.

Портал Super Job – лидер рынка онлайн-рекрутмента – собрал статистику о том, какими навыками должны обладать сотрудники сферы IT-технологий [6]. Рисунок 3 демонстрирует необходимые soft skills специалиста в сфере IT и телекоммуникаций, упомянутые в вакансиях.

У выпускников университетов, обладающих такими качествами, существенно больше шансов быть трудоустроенными по своей специальности в IT-сфере и быстрее адаптироваться в профессиональной среде и достигнуть успехов в IT-профессии. К настоящему времени проведено много исследований, показывающих влияние soft skills на успешность профессиональной деятельности.

Исследования, представленные в работе [7], демонстрирует вклад различных soft skills в адаптацию и достижение успехов в IT-профессии (процентное выражение от общего числа опрошенных респондентов):

- навыки самостоятельного обучения – 60,3 %;
- самомотивация, умение ставить перед собой цели и достигать их – 15,3 %;
- самодисциплина – 6,1 %;
- навыки общения – 6 %;
- хорошие базовые знания, полученные в вузе, – 5 %;
- устойчивость к стрессам – 3,6 %;
- владение иностранными языками – 1,5 %.

Исходя из представленных результатов опроса можно констатировать, что успех деятельности специалиста в IT-сфере на 80 % зависит от его soft skills.

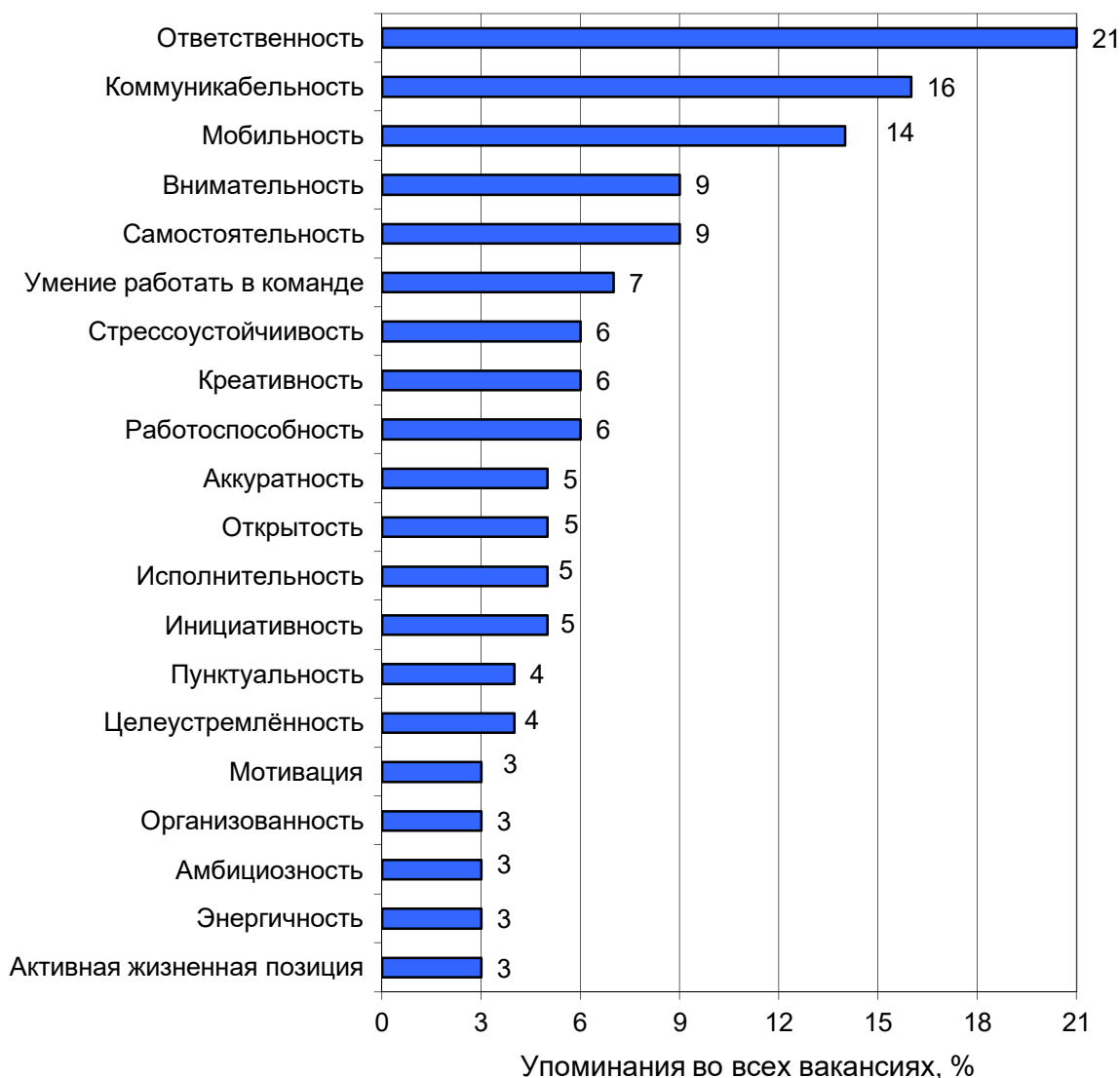


Рис. 3. TOP-20 самых востребованных личных качеств специалиста в сфере IT и телекоммуникаций, упомянутых в вакансиях (Россия)

Fig. 1. TOP-20 most popular personal qualities of a specialist in the field of IT and telecommunications, mentioned in vacancies (Russia)

Верно и то, чтобы оставаться востребованными на рынке труда и быть успешными в условиях развития цифровой экономики и IT-технологий, не обойтись без профессиональных знаний и умений. Приобрести необходимые профессиональные навыки также помогли такие личные качества IT-специалиста, как:

- самостоятельное обучение и опыт – 58,7 %;
- общение и помощь коллег – 25 %;
- чтение книг и статей – 8,8 %;
- образование, полученное в учебном заведении, – 6 %;
- курсы – 1,5 %.

Поэтому многие компании обращают внимание на обучаемость претендента на должность, которая составляет основу карьерного потенциала, – всего того, что конкретный человек может дать компании.

В научных публикациях, анализирующих развитие системы высшего образования в России, указывается на необходимость широкого использования интерактивных технологий в подготовке IT-специалистов. Интерактивные технологии обучения – это организация учебного процесса, основанная на коллективном взаимодействии, в котором все его участники вовлечены в коллективный и взаимодополняющий активный познавательный процесс. Многочисленные исследования в области организации учебного процесса доказали, что интерактивные технологии обучения являются эффективным инструментом формирования профессиональных компетенций (т. н. профессиональные навыки, или «жесткие навыки», – *hard skills*) и личных качеств (так называемые «мягкие навыки» – *soft skills*), востребованных современным рынком труда.

В число интерактивных технологий входят *case study*, интеллектуальные, ролевые и деловые игры, мозговой штурм, дискуссии. Эти технологии хорошо известны – им посвящено большое количество научных работ, они апробированы и широко используются в системе высшего образования и успешно интегрируются в образовательный процесс при

подготовке студентов по различным образовательным программам технического, гуманитарного, медицинского и др. направлениям [8; 9; 10].

Выполненный анализ научных работ в сфере высшего образования также показал, что, несмотря на интенсивный поиск и внедрение инновационных методов подготовки IT-специалистов, в настоящее время недостаточно изучен вопрос о месте и роли дискуссии как педагогической технологии в подготовке IT-специалистов в части развития *soft skills*, что придает рассматриваемому исследованию актуальность.

Материалы и методы

В основу методологии исследования положен компетентностный, контекстный и интегративный подход в образовании. Использовались традиционные для теоретико-прикладных исследований методы – анализ, синтез, педагогическое наблюдение, систематизация фактов.

Компетентностный подход акцентирует внимание на формировании и развитии у обучаемых умений самостоятельно учиться и применять приобретенные знания и опыт в различных сферах и видах деятельности, способность работать в состоянии неопределенности и принимать самостоятельные решения.

Содержание образования, сформированное в контексте будущей профессиональной деятельности, в компетентностном подходе реализуется посред-

ством комплекса интерактивных образовательных технологий, интегрированных в учебно-воспитательный процесс, в соответствии с чем обучение рассматривается как многоуровневый непрерывный и целостный процесс.

Материалом настоящего исследования послужили научные публикации, освещающие практический опыт организации и проведения учебных дискуссий, исследующие образовательный потенциал дискуссий как педагогических технологий, а также собственный опыт их организации и проведения при подготовке студентов по направлению «Программная инженерия».

Использовались традиционные для теоретико-прикладных исследований методы – анализ, синтез, педагогическое наблюдение, систематизация фактов.

Результаты и их обсуждение

В исследованиях последних лет (М. В. Шмитькова, Е. С. Быкадорова, А. В. Перфилова, Е. Г. Катаева, Р. Н. Агашина, С. Г. Коростелева, А. С. Жукова, Т. В. Михайлова, А. А. Бирюкова, Д. Р. Гришина, М. А. Нагоева) дискуссия рассматривается одной из базовых технологий интерактивного обучения как инновационный метод познания и метод интенсификации учебного процесса.

В работе Т. В. Антоновой [11] дискуссия исследована как педагогический прием, способствующий развитию мотивационной сферы студента и формированию коммуникативных навыков студентов вузов.

В научных публикациях С. Г. Ахременко, Л. Д. Устьянцевой, Л. Б. Буровой, Н. И. Ефимовой, Л. А. Коняевой дискуссия исследуется как средство формирования коммуникативной культуры и компетенции студентов, как метод активного социально-психологического обучения.

Анализ научных публикаций по проблемам высшей школы показал, что образовательный потенциал дискуссии как педагогической технологии велик и разнообразен по сфере приложения, но он не востребован при подготовке IT-специалистов в университетах. Причиной являются недостаточное владение технологией ее организации, нежелание проводить это трудоемкое мероприятие. Как следствие, возникло противоречие между требованием к качеству подготовки будущих IT-специалистов и использованием дискуссии как педагогической технологии в образовательном процессе.

В данной статье дискуссия исследована как педагогическая технология формирования, развития и закрепления soft skills у студентов направления подготовки «Программная инженерия» в ходе защиты отчетов по результатам прохождения производственных практик, установленных образовательной программой подготовки, поскольку эти виды практик являются основной структурной единицей образовательной программы. Практикам отводится первостепенная роль в образовательном процессе, так как в ходе непосредственной

работы в организациях, офисах, промышленных предприятиях соединяются в единое целое и закрепляются профессиональные компетенции (hard skills), полученные в ходе теоретических занятий в университете, формируются, развиваются и закрепляются личные качества студента. Для специалистов в области IT-технологий различные виды практик имеют большое значение, ведь от того, насколько молодой выпускник, приступив к самостоятельной работе, сумеет применить свои знания и реализовать личные качества, в полной мере зависит успех его профессиональной деятельности.

Выбор дискуссии для обсуждения результатов практик обусловлен тем, что дискуссия – технология, основанная на публичном обсуждении проблем, свободном высказывании мнений, суждений по рассматриваемой проблеме. Этот вид взаимодействия между участниками образовательного процесса предполагает активный обмен мнениями, рассмотрение проблемы с разных точек зрения, многостороннюю коммуникацию, поиск нового решения и т. д. В конечном счете с образовательной точки зрения позволяет выявить и оценить soft skills будущего специалиста.

Подходы и рекомендации к проведению дискуссии изложены в работах Р. Н. Аганиной, М. В. Кларина, О. А. Павловой, В. А. Горохова, В. И. Литвинчук, И. Г. Мухамадеева и использовались как

основа подготовки и проведения дискуссий с учетом особенностей образовательной программы и содержания производственных практик студентов направления подготовки «Программная инженерия».

По итогам производственной практики в 2018-2020 гг. было организовано обсуждение конкретных производственных ситуаций.

На первом, подготовительном этапе формировалась временная группа для подготовки дискуссии с ведущим дискуссии (модератором), осуществлялся поиск и определение проблемы, которая может решаться путем дискуссии. Для этого каждый из студентов представил производственный материал руководителю практики и экспертам из числа преподавателей кафедры, магистрантов второго года обучения, образующих временную группу, с тем, чтобы поделиться с выбором актуальных проблем-ситуаций общих для большинства студентов группы и цели дискуссии. Отбирались не более одной-двух проблем, но имеющих несколько вопросов для обсуждения, актуальных для фирмы (организации, предприятия) и дальнейшего использования и развития IT-технологий в пределах имеющихся ресурсов. Материал, который должны освоить все участники, систематизировался и структурировался. На этом этапе формулировались правила проведения мероприятия, регламент, готовилась аудитория проведения и необходимые технические средства демонстрации материалов и

фиксации обсуждения, составлялся список приглашенных лиц из числа специалистов.

Чтобы дискуссия была более плодотворной и содержательной, на втором этапе – введение в дискуссию – осуществлялась мотивация, вовлечение и подготовка студентов к обсуждению конкретных проблем в виде интеллектуальной разминки по теме дискуссии, что позволяло актуализировать имеющиеся у студентов профессиональные знания, умения и опыт по теме дискуссии, личные качества. Эта работа весьма необходима, поскольку содержание и индивидуальный стиль мыслительной деятельности членов группы может быть различным, также студенты в группе обладают разным уровнем профессиональных знаний и личных качеств. Организаторы исходили из того, что для получения эффективного результата необходимо, чтобы каждый член команды отчетливо понимал существо рассматриваемых вопросов, их своевременность, необходимость и полезность обсуждения, предвидел возможные вопросы оппонентов и был готов ответить. Любой участник дискуссии на этом этапе заблаговременно мог сформулировать свой взгляд на имеющиеся проблемы и сообщить его остальным участникам. Обмен первоначальными взглядами как раз и закладывал фундамент для дискуссии.

Студенты предварительно были ознакомлены с существенными нежелательными характеристиками языкового

выражения дискуссионного текста, к которым относятся: фрагментарная речь; экономия языкового выражения; избыточность слов; тенденция к использованию невербальных средств общения; тенденция к экспрессивности.

Организаторы обращали внимание участников на соблюдение этических норм выступления и поведения с тем, чтобы избежать некорректного общения, чтобы дискуссия не превратилась в фарс и бесконтрольный эмоциональный спор, которые не могут привести ни к каким конструктивным результатам.

Третий этап – дискутирование – собственно обсуждение проблемы, непосредственно сам процесс дискуссии. Он включал: вводное слово модератора, определяющего тему и цели дискуссии, представление участников, установление регламента, собственно выступление, коммуникативный диалог выступающих участников: обсуждение, обмен мнениями, ответы на вопросы присутствующих, аргументы и контраргументы.

Дискуссия осуществлялась последовательно, проходя четыре периода:

1) стимуляция – задаются вопросы, которые вынуждают участников занять определенную позицию и высказать собственное мнение;

2) мягкая конфронтация – участники высказывают свои взгляды на проблему в конструктивном русле;

3) аргументация – выступающие приводят факты, примеры, доказательства для обоснования своей точки зрения на проблему;

4) консенсус – сравнение позиций, консолидация решений, генерирование идей, позволяющих сформировать коллективное решение.

На заключительном четвёртом этапе выполняется краткий обзор представленных фактов, обобщаются и систематизируются мнения того, что обсуждено по основной теме, выполняется критическая оценка высказываний, отмечаются альтернативные позиции и наиболее интересные идеи, на основе этого вырабатывается общее решение, дается анализ хода обсуждения, подводятся итоги.

В качестве примера приведем темы дискуссии, представляющие, как следует из заключения Gartner Hype Cyclus, важнейшие IT-технологии, которые, как прогнозируется, существенно трансформируют общество и бизнес в следующие 5–10 лет:

- тема «Формирующий искусственный интеллект»;
- тема «Компонуемая архитектура»;
- тема «Алгоритмическое моделирование распознавания и обработки изображений»;
- тема «Методы обработки больших массивов данных»;
- тема «Интеллектуальные технологии поддержки принятия решений».

Дискуссия как групповое обсуждение проблемы является важным этапом

демонстрирования и одновременно формирования профессиональных компетенций (hard skills) и личных качеств (soft skills) – всего того, что ценится в IT-специалистах. Несмотря на то, что в различных компаниях требования к IT-специалисту могут быть несхожими, однако существует ключевой набор soft skills, которые совершенно необходимы любому современному IT-специалисту, и именно их пытается увидеть в потенциальных сотрудниках работодатель в лице эксперта в ходе групповых обсуждений результатов практик. Исчерпывающее групповое обсуждение проблемы с определенным, аргументированным решением по существу всегда будет достойно оценено.

При оценке результативности дискуссии внимание экспертов, конечно же, было акцентировано на профессиональных навыках. Но в контексте поставленной задачи основное внимание обращалось на то, как говорит студент, на его способности слушать и убеждать других, на его взаимоотношение коллегами и его уверенность в собственных силах.

В ходе групповой дискуссии оценивались следующие личные качества, образующие soft skills:

1. Навыки вербальной коммуникации и убеждения. В процессе обсуждений в первую очередь оцениваются коммуникативные навыки и навыки межличностного общения. Основным компонентом является способность результативно представить свою точку зрения на проблему.

2. Лидерские навыки. В групповой дискуссии, как правило, участвует до 10 человек, где очевидно влияние одного человека на другого или одного на группу. Эксперты обращали внимание не только на тех, кто инициировал дискуссию, но и на тех, кто направлял ее в нужное русло.

3. Эмоциональное поведение. В групповой дискуссии оценивался уровень эмоций и интеллекта. «Подумай, прежде чем сказать», – эта старая пословица приобретает особое значение в групповом обсуждении. Эксперты следует обращали внимание на эмоциональную сферу, неловкие спонтанные высказывания.

4. Аналитическое и рациональное мышление. Работодатели предпочитают кандидатов на должность, которые могут четко, быстро и беспристрастно проанализировать ситуацию, спокойно и объективно представить информацию. Проявление этих качеств регистрировали эксперты.

5. Общая осведомленность. Так как в дискуссии, как правило, главное внимание уделяется конкретной профессиональной теме, то не требуется демонстрации специальных знаний в смежных областях деятельности и технологий. Тем не менее экспертам было необходимо иметь представление о знаниях участников об их общих особенностях, особенно если практика (или будущая профессиональная деятельность) связана с ними. Это качество регистрировали эксперты.

6. Групповое поведение. Работа в современной профессиональной среде строится на объединении усилий различных специалистов. Следовательно, умение работать в команде имеет существенное значение для удачного осуществления любого проекта. Дискуссия является отличной площадкой для оценки этого личного качества. В связи с чем эксперты оценивали необходимые для успешной командной работы навыки общения и характер поведения участников.

В отличие от *hard skills* уровень владения *soft skills* трудно измерить, но игнорировать оценку личных качеств нельзя. Следует исходить из постулата – каждое качество имеет индикаторы, а каждый индикатор – уровни проявления. Для удобства работы и объективной оценки по итогам дискуссии уровня личных качеств использовались формы, включающие конкретные индикаторы и уровни достижения. Использовалась пятибалльная оценка.

Разработанная форма и подготовленный бланк упрощает фиксацию проявлений по указанным индикаторам. Позволяет унифицировать оценку у группы оцениваемых лиц. Пример такой формы, разработанной для оценки навыков вербальной коммуникации и убеждений, приведен в виде таблицы 1. Оценивалось фонетическое и лексическое оформление речи, содержание, убедительность высказывания и другие характеристики.

Таблица 1. Форма оценки навыков вербальной коммуникации и убеждений**Table 1.** Form of assessment of verbal communication skills and beliefs

Фамилия, имя, отчество:	Курс:	Группа:				Шифр:
Тема дискуссии						
Индикаторы						
Положительное проявление качеств	Оценка					Отрицательное проявление качеств
	5	4	3	2	1	
Речь четкая, ровный уверен- ный голос, плавное течение речи без ускорения или из- лишнего замедления, заика- ния и глотания окончаний слов	+					Запинается, бормочет, мям- лит или колеблется; говорит сбивчиво, невнятно или настолько тихо, что аудито- рия не слышит его; наличие междометий; повышенный голос, скороговорка и другие характеристики, не позволя- ющие воспринимать инфор- мацию в полном объеме и её суть
Делает комментарии, которые являются точными и лёгкими для понимания		+				Использует жаргонные выра- жения; составляет сообщения многословно и/или неодно- значно; в речи присутствуют слова-паразиты
Адаптирует язык под аудито- рию; использует разнообраз- ный и выразительный язык; правильно выстраивает фразы и речевые обороты; пользу- ется правильным словесным и логическим ударением; отсут- ствуют водные слова, не несущие смысловой нагрузки		+				Монотонный и невыразитель- ный язык и тон речи; вклю- чает речевые обороты и фразы, не несущие смысло- вой нагрузки; нет связующих слов – «перепрыгивает» на изложение следующей мысли

Окончание табл. 1 / Table 1 (ending)

Положительное проявление качеств	Оценка					Отрицательное проявление качеств
	5	4	3	2	1	
Проверяет понимание своей речи другими людьми и пере-страивает стиль изложения в соответствии с представляе-мым материалом, положи-тельно реагирует на подсказки				+		Не слышит других; не в со-стоянии адаптировать стиль изложения или искать обрат-ную связь; не реагирует на аудиторию
Подводит итоги выступления, активно выслушивает других и запрашивает разрешения на комментариев; проявляет ис-кренней интерес к слушате-лям и их позициям			+			Отказывается признать вклад других в решение проблемы; не показывает активного слу-шания и обсуждения
Поддерживает зрительный контакт во время выступления и ответов		+				Отсутствует зрительный кон-такт с аудиторией: смотрит в пол или поверх голов, отсут-ствующий взгляд, при слуша-нии отвлекается на посторон-ние вещи
При возражениях корректно и уверенно защищает свою по-зицию; если требуется, то адаптирует аргументы; с ува-жением и вниманием отно-сятся к аргументам противो-положной стороны	+					Некорректное поведение как принципиальная позиция в споре; подмена тезиса; оття-гивание ответа длительным молчанием; использование ложных и недоказанных аргу-ментов; намеренное запуты-вание мыслей оппонента нарочито усложненной, а то и просто путаной формой от-вета
Сумма баллов	10	12	1	1	-	24
Средний балл	3,43					
Заключение эксперта:						
Сильные стороны:						
Слабые стороны:						

Аналогичные формы были разработаны для оценки других качеств, образующих группу soft skills. Формы могут быть дополнены, расширены в зависимости от необходимости детальной оценки тех или иных качеств по запросу эксперта. Однако усложнять формы не стоит, поскольку избыточность критериев затруднит работу экспертов при обработке форм. Необходимо четко зафиксировать индикаторы, по которым будут оцениваться результаты по каждому навыку.

Затем подводилась общая оценка качеств участников дискуссии, используя метод рейтинговых шкал оценок, по четырем уровням: уровень «лидер» оценивается в пределах от 5 до 4 баллов; уровень «базовый» оценивается в пределах $4 \leq 3$; «ограниченный», требующий развития, оценивается в пределах $3 \leq 2$; неприемлемый «аутсайдер» ≤ 2 .

Таблица 2 демонстрирует результаты оценки качеств участников дискуссии.

Таблица 2. Результаты оценки личных качеств участников дискуссии

Table 2. Results of the assessment of the personal qualities of the participants of the discussion

Наименование качеств, образующего soft skills	Балльная оценка уровня	
	max	min
1. Навыки вербальной коммуникации и убеждения	4,1	2,4
2. Лидерские навыки	4,5	1,7
3. Эмоциональное поведение	3,9	1,9
4. Аналитическое и рациональное мышление	4,2	2,3
5. Общая осведомленность	4,4	1,8
6. Групповое поведение	3,7	2,7

Трудности оценки формирования «мягких навыков» связаны с низкой мотивацией студентов к их освоению и демонстрированию в разрезе сложного комбинирования профессиональных умений и личных качеств.

Дискуссия выявила ряд проблем, которые необходимо выделить и решать.

Не все студенты умеют четко излагать мысли, не умеют дать развернутый ответ на поставленный вопрос. Часть из

них склонна упрощать общение вплоть до отдельных звуков и жестов.

Следует также отметить со стороны обучающихся нарушение норм научной дискуссии (признаки взрыва эмоций или, наоборот, апатия; вопросы и ответы не по теме доклада и т. п.). Причина кроется в том, что у студентов недостаточно развит эмоционально-волевой контроль. Развитие эмоциональной устойчивости и волевого самоконтроля происходит в силу накопления опыта.

Студенты из-за отсутствия практического опыта работы в IT-компаниях сильно недооценивают умение действовать в команде. Но при этом они преувеличивают значимость креативности и лидерских качеств.

Качества и навыки, связанные с эмоциями человека, становятся ключевым связующим звеном в командной работе. По мнению лидеров IT-индустрии, их недостаток может привести к недомолвкам, снижению результатов и пропущенным срокам исполнения задания.

Самое трудное – развивать навыки, которые опираются на внутренние убеждения и установки человека, его качества. В этом случае внутренние убеждения либо поддерживают требуемый навык, либо блокируют.

Основу всех мягких навыков составляют базовые черты характера, которые почти невозможно изменить у взрослого человека. Необходима постоянная образовательная практика и условия для развития и закрепления личных качеств, а также среда, которая будет мотивировать на развитие и поддерживать нужное проявление навыка.

Выводы

Нет наиболее или наименее важных soft skills. Есть те, которые нужны IT-

специалисту в текущий момент времени для решения задач и достижения успеха. Всё определяется реальностью, в которой он находится, и от того, какие качества уже развиты и в какой мере.

Дискуссия является эффективной технологий группового взаимодействия, обладает большими возможностями в профессиональном обучении, обеспечивает проявление индивидуальности и активное включение студентов в поиск и доказательство истины, создает условия для открытого выражения ими своей точки зрения на определенную проблему, чем способствует развитию soft skills – всех тех качеств, которые ценятся в IT-специалистах.

Дискуссию следует рассматривать как педагогическую технологию интерактивного обучения, применение которой в совокупности с другими интерактивными технологиями предоставляет возможность создать ситуации, где нужны навыки коммуникации, командной работы и эмпатии. Они учатся на таких ситуациях и постепенно улучшают «мягкие навыки». Важно прорабатывать основные производственные ситуации в среде обучения, что позволит в будущем справиться со стрессом в профессиональной среде.

Список литературы

1. Ивонина А. И., Чуланова О. Л., Давлетшина Ю. М. Современные направления теоретических и методических разработок в области управления: роль soft-skills и hard skills в профессиональном и карьерном развитии сотрудников // Интернет-журнал

«НАУКОВЕДЕНИЕ». 2017. Т. 9, № 1. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/90EVN117> (дата обращения: 20.05.2021).

2. Раицкая Л. К., Тихонова Е. В. SOFT SKILLS в представлении преподавателей и студентов российских университетов в контексте мирового опыта // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Психология и педагогика. 2018. Т. 15, № 3. С. 350-363.

3. Современные детерминанты развития soft skills / С. Н. Бацунов, И. И. Дереча, И. М. Кунгурова, Е. В. Слизкова // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2018. № 4. С. 198-207. URL: <http://e-koncept.ru/2018/181018.htm> (дата обращения: 20.05.2021).

4. Почему программистам не обойтись без «гибких навыков». URL: <https://trends.rbc.ru/trends/education/5eaff3b09a79470a6106398a> (дата обращения: 20.05.2021).

5. Цифровая зрелость российских компаний. URL: <https://ict.moscow/research/tsikl-khaipa-razvivaiushchikhsia-tekhnologii/> (дата обращения: 20.05.2021).

6. Личные качества специалиста в сфере IT и телекоммуникаций. URL: https://moeobrazovanie.ru/lichnye_kachestva_spetsialista_v_sfere_it_technologiy.html (дата обращения: 27.05.2021).

7. Шелудько И. Мое исследование – кто работает в IT-профессии, навыки, мотивация, развитие карьеры, технологии. URL: <https://habr.com/ru/post/481812/> (дата обращения: 20.05.2021).

8. Ребус Н. А., Поколодина Е. В. О современных интерактивных методах подготовки ИТ-специалистов в контексте цифровой экономики // Этап: экономическая теория, анализ, практика. 2020. № 3. С. 110-123.

9. Томакова Р. А., Томакова И. А., Брежнева А. Н. Интегративный образовательный процесс как фактор повышения качества образования в университете // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Лингвистика и педагогика. 2018. Т. 8, № 4 (29). С. 142-155.

10. Томаков В. И., Томаков М. В., Брежнев А. В. Применение интерактивных технологий как фактор повышения эффективности учебного процесса // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Лингвистика и педагогика. 2018. Т. 8, № 3 (28). С. 110-123.

11. Антонова Т. В. Дискуссия как средство формирования мотивационной сферы студентов вуза // ЦИТИСЭ. 2020. № 4 (26). С. 234-249.

References

1. Ivonina A. I., Chulanova O. L., Davletshina Yu. M. Sovremennye napravleniya teoreticheskikh i metodicheskikh razrabotok v oblasti upravleniya: rol' soft-skills i hard skills v professional'nom i kar'ernom razvitii sotrudnikov [Modern directions of theoretical and methodological developments in the field of management: the role of soft-skills and hard skills in the professional and career development of employees]. *Internet-zhurnal "Naukovedenie" = Online Journal "Science Studies"*, 2017, vol. 9, no. 1. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/90EVN117>. (accessed 20.05.2021)
2. Raickaya L. K., Tihonova E. V. SOFT SKILLS v predstavlenii prepodavatelej i studentov Rossijskikh universitetov v kontekste mirovogo opyta [SOFT SKILLS in the representation of teachers and students of Russian universities in the context of world experience]. *Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Psihologiya i pedagogika = Bulletin of the Russian University of Friendship of Peoples. Series: Psychology and Pedagogy*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 350-363.
3. Bacunov S. N., Derecha I. I., Kungurova I. M., Slizkova E. V. Sovremennye determinanty razvitiya soft skills [Modern determinants of soft skills development]. *Nauchno-metodicheskij elektronnyj zhurnal "Koncept" = Scientific and Methodological Electronic Journal "Concept"*, 2018, no. 4, pp. 198-207. Available at: <http://e-koncept.ru/2018/181018.htm>. (accessed 20.05.2021)
4. Pochemu programmistam ne obojtis' bez "gibkikh navykov" [Why programmers can't do without "flexible skills"]. Available at: <https://trends.rbc.ru/trends/education/5eaff3b09a79470a6106398a>. (accessed 20.05.2021)
5. Cifrovaya zrelost' rossijskikh kompanij [Digital maturity of Russian companies]. Available at: <https://ict.moscow/research/tsikl-khaipa-razvivaiushchikhsia-tekhnologii/>. (accessed 20.05.2021)
6. Lichnye kachestva specialista v sfere IT i telekommunikacij [Personal qualities of a specialist in the field of IT and telecommunications]. Available at: https://moeobrazovanie.ru/lichnye_kachestva_spetsialista_v_sfere_it_tehnologiy.html. (accessed 27.05.2021)
7. Shelud'ko I. Moyo issledovanie – kto rabotaet v IT-professii, navyki, motivaciya, razvitiye kar'ery, tekhnologii [My research – who works in the IT profession, skills, motivation, career development, technology]. Available at: <https://habr.com/ru/post/481812/>. (accessed 20.05.2021)
8. Rebus N. A., Pokolodina E. V. O sovremennykh interaktivnykh metodah podgotovki IT-specialistov v kontekste cifrovoj ekonomiki [On modern interactive methods of training IT specialists in the context of the digital economy]. *Etap: ekonomicheskaya teoriya, analiz, praktika = Stage: Economic Theory, Analysis, Practice*, 2020, no. 3, pp. 110-123.

9. Tomakova R. A., Tomakova I. A., Brezhneva A. N. Integrativnyj obrazovatel'nyj process kak faktor povysheniya kachestva obrazovaniya v universitete [Integrative educational process as a factor of improving the quality of education at the University]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Lingvistika i pedagogika = Proceedings of the Southwest State University. Series: Linguistics and Pedagogics*, 2018, vol. 8, no. 4 (29), pp. 142-155.

10. Tomakov M. V., Tomakov V. I., Brezhnev A. V. Primenenie interaktivnyh tekhnologij kak faktor povysheniya effektivnosti uchebnogo processa [The use of interactive technologies as a factor in improving the effectiveness of the educational process]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Lingvistika i pedagogika = Proceedings of the Southwest State University. Series: Linguistics and Pedagogics*, 2018, vol. 8, no. 3 (28), pp. 110-123.

11. Antonova T. V. Diskussiya kak sredstvo formirovaniya motivacionnoj sfery studentov vuza [Discussion as a means of forming the motivational sphere of university students]. *CITISE = CITISE*, 2020, no. 4 (26), pp. 234-249.

Информация об авторах / Information about the Authors

Томакова Римма Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: rtomakova@mail.ru,
ORCID iD: 0000-0003-0152-4714,
Researcher ID WoS: O-6164-2015,
Author ID: 739221

Rimma A. Tomakova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: rtomakova@mail.ru,
ORCID iD: 0000-0003-0152-4714,
Researcher ID WoS: O-6164-2015,
Author ID: 739221

Томаков Максим Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры охраны труда и окружающей среды, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: tomakovmv@mail.ru,
ORCID iD: 0000-0003-3158-964X,
Scopus Author ID: 57195918541,
Author ID: 452881

Maxim V. Tomakov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Labor Protection and Environment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: tomakovmv@mail.ru,
ORCID iD: 0000-0003-3158-964X,
Scopus Author ID: 57195918541,
Author ID: 452881

МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Оригинальная статья / Original article

УДК 629.5.067.8+699.88

Метод синтеза математических моделей оценки пожарной обстановки и состояния людей, находящихся в зоне пожара

Н. А. Корневский¹ ✉, М. В. Шевцов², Л. В. Стародубцева¹, Г. В. Сипливый³

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

² Академия Государственной противопожарной службы МЧС России,
ул. Бориса Галушкина 4, г. Москва 129366, Российская Федерация

³ Курский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. К. Маркса 3, г. Курск 305041, Российская Федерация

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Резюме

Целью работы является повышение качества оценки пожарной обстановки с оценкой состояния здоровья людей, находящихся в зоне пожара на основе использования методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил и нейросетевых технологий.

Методы. В ходе проведенных исследований было показано, что для повышения качества принимаемых решений о типе и характере пожаров целесообразно использовать три группы датчиков, измеряющих интенсивность электромагнитных излучений в диапазонах ультрафиолетового, видимого и инфракрасного спектров, химического состава (угарного газа, двуокиси углерода, фенолов и др.) и температуры.

Анализ природы, характера, типов и характеристик различных типов пожаров показал, что детальная классификация этих явлений относится к плохоформализуемым задачам с нечеткой структурой данных. К такому же классу задач относится и оценка состояния людей, находящихся в зоне пожаров.

С учетом этого обстоятельства в качестве базового математического аппарата была выбрана нечеткая логика принятия решений и, в частности, методология синтеза гибридных нечетких решающих правил в сочетании с нейросетевыми технологиями.

Результаты. Используя методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил как базовую математическую теорию с учетом специфики структуры данных, в работе предложен метод синтеза математических моделей оценки пожарной обстановки и состояния людей, находящихся в зоне пожара. Реализация метода осуществляется с использованием теории измерения латентных переменных, затем формируется пространство информативных признаков, синтезируются нечеткие гибридные модели для классификации типов и характера пожаров, строятся модели прогнозирования развития пожарной обстановки и обобщаются модели прогнозирования и диагностики состояния людей, находящихся в зоне пожара. Эффективность работы предложенного метода была проверена на установлении оценки степени тяжести отравления угарным газом людей, находящихся в зоне пожара.

© Корневский Н. А., Шевцов М. В., Стародубцева Л. В., Сипливый Г. В., 2021

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление,
вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021; 11(3): 142-159

Заключение. Практическое применение предложенного метода позволяет создавать высококачественные системы, размещающиеся на подвижных и неподвижных платформах, для оценки пожарной обстановки и состояния людей в зоне исследуемого класса чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: метод синтеза гибридных нечетких решающих правил; математические модели; оценка пожарной безопасности; чрезвычайные ситуации.

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

Для цитирования: Метод синтеза математических моделей оценки пожарной обстановки и состояния людей находящихся в зоне пожара / Н. А. Корневский, М. В. Шевцов, Л. В. Стародубцева, Г. В. Сипливый // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 3. С. 142–159.

Поступила в редакцию 10.07.2021

Подписана в печать 05.08.2021

Опубликована 30.09.2021

Method of Synthesis of Mathematical Models for Assessing the Fire Situation and the Condition of People in the Fire Zone

Nikolay A. Korenevsky¹ ✉, Maxim V. Shevtsov², Lilia V. Starodubtseva¹,
Gennady V. Siplivy³

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

² Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
4 Boris Galushkin str., Moscow 129366, Russian Federation

³ Kursk State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation
3 Marx str., Kursk 305041, Russian Federation

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Abstract

The purpose of the research to improve the quality of fire situation assessment with an assessment of the health status of people in the fire zone based on the use of the methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules and neural network technologies.

Methods. In the course of the conducted studies, it was shown that to improve the quality of decisions about the type and nature of fires, it is advisable to use three groups of sensors that measure the intensity of electromagnetic radiation in the ranges of ultraviolet, visible and infrared spectra, chemical composition (carbon monoxide, carbon dioxide, phenols, etc.) and temperature.

An analysis of the nature, nature, types and characteristics of various types of fires has shown that a detailed classification of these classes of phenomena refers to poorly formalized problems with a fuzzy data structure. The assessment of the condition of people in the fire zone also belongs to the same class of tasks.

Taking into account this circumstance, the fuzzy logic of decision-making was chosen as the basic mathematical apparatus, and in particular, the methodology for the synthesis of hybrid fuzzy decision rules in combination with neural network technologies.

Results. Using the methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules as a basic mathematical theory, taking into account the specifics of the data structure, the paper proposes a method for synthesizing mathematical models for assessing the fire situation and the condition of people in the fire zone during the implementation of which, using the theory of measuring latent variables, a space of informative features is formed, fuzzy hybrid models of classification of types and nature of fires are synthesized, models of forecasting the development of the fire situation are built and models of forecasting and diagnosing the condition of people who are sent and are in the fire zone are synthesized. The effectiveness of the proposed method was tested on the task of assessing the severity of carbon monoxide poisoning of people in the fire zone.

Conclusion. The practical application of the proposed method allows us to create high-quality systems for assessing the fire situation and the condition of people in the zone of the studied class of emergency situations located on mobile and fixed platforms.

Keywords: the method of synthesis of hybrid fuzzy decision rules; mathematical models; fire safety assessment; emergency situations.

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

For citation: Korenevsky N. A., Shevtsov M. V., Starodubtseva L. V., Siplivy G. V. Method of Synthesis of Mathematical Models for Assessing the fire Situation and the Condition of People in the Fire Zone. *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. 2021; 11(3): 142–159. (In Russ.)

Received 10.07.2021

Accepted 05.08.2021

Published 30.09.2021

Введение

Одними из важнейших задач в борьбе с пожарами являются своевременное их обнаружение, оценка их параметров и степени тяжести состояния людей, находящихся в зоне их воздействия.

Анализ современных технических средств обнаружения пожаров показывает, что в качестве первичных датчиков обнаружения и контроля за пожарной обстановкой используют датчики дыма и других сопутствующих газов, датчики температуры и датчики электромагнитных излучений ультрафиолетового видимого и трех инфракрасных диапазонов [1; 2; 3; 4; 5; 6].

В ходе экспериментальных исследований было доказано, что наиболее

надежное обнаружение, особенно ранних стадий возгораний, обеспечивается, если используются комбинированные датчики, например многоспектральный датчик, работающий в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазоне, дымовой пожарный извещатель, совмещенный с датчиками температуры и т. д. [4; 6].

Как правило, датчики с различных контролируемых мест по проводным или радиоканалам связываются с диспетчерскими пунктами, а решение о возгорании принимаются по простым пороговым алгоритмам по превышению контролируемых параметров заданной пороговой величины.

На практике комбинированные датчики реагируют на три-четыре компо-

нента пожара, что не всегда обеспечивает требуемую и (или) потенциально достигаемую точность принятия решений. Вопросам прогноза и оценки состояния людей, находящихся в зоне пожар, уделяется недостаточно внимания.

С учетом сказанного целью работы является повышение качества принятия решений о характере пожарной обстановки, прогнозе и оценке состояния людей, находящихся в зоне действия пожара за счет использования гибридных интеллектуальных технологий.

Материалы и методы

При выборе источников первичной информации (сенсоров, датчиков) о пожарной и экологической обстановке в зоне контроля следует иметь в виду, что разнообразные источники пламени порождают различные диапазоны электромагнитного излучения, такие как ультрафиолетовый участок (0,1...0,4 Мкм), участок видимого света (0,4...0,75 Мкм), ближний инфракрасный (0,75...1,5 Мкм), средний инфракрасный (0,5... 5,6 Мкм), дальний инфракрасный (5,6...100 Мкм).

С учетом того что каждый очаг горения имеет индивидуальную спектральную характеристику, многоспектральный (многодиапазонный) анализ пламени потенциально может быть использован для распознавания типов и характера пламени [4]. При этом следует

иметь в виду, что основная мощность электромагнитного излучения сосредоточена в ИК-диапазоне и в этом же диапазоне сконцентрирована основная доля помех, например, от солнца. С другой стороны, проводимые эксперименты показывают, что совместный анализ источника пламени в различных частотных диапазонах позволят «отстроиться» от подавляющего большинства помех.

Значительную долю информации о возникновении и развитии пожаров несет изменение химического состава воздушной среды, вызванное воздействием пожара. Исследования показывают, что раньше всего, часто задолго до возникновения открытого пламени, в зоне возникновения пожара возникает угарный газ (СО). Это основной компонент для определения тлеющих очагов возгораний. Углекислый газ (СО₂) начинает активно выделяться в начале перехода к открытому пламени. Целый класс пожаров выделяет летучие ароматические углероды и т. д.

Высокой информативностью по отношению к обнаружению пожаров обладают также температура и специфические задымления.

На рисунке показаны графики времени появления различных составляющих по мере развития пожаров.

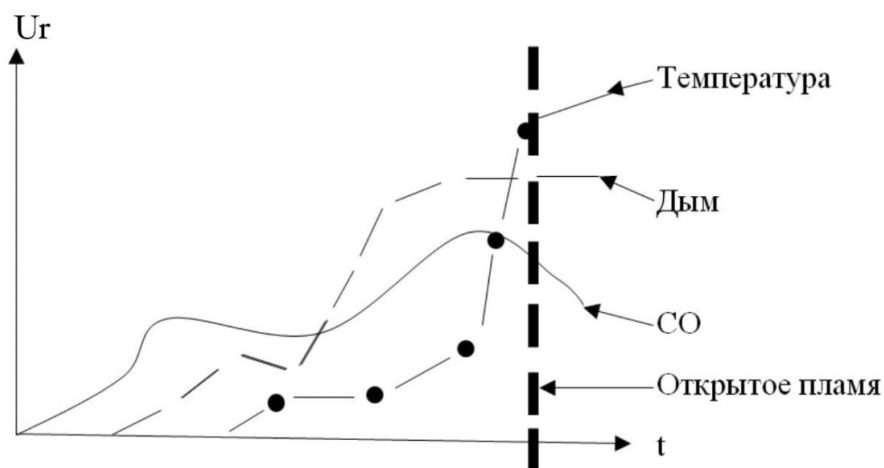


Рис. 1. График времени появления различных составляющих пожара: U_r – уровень; t – время

Fig. 1. Time graph of the appearance of various components of the fire: U_r -level; t -time

Таким образом, существует комбинация значений различных параметров ЭМП, химических веществ, включая дым в сочетании с температурой, которые в той или иной степени характеризуют стадии и тип возгорания.

Все эти параметры оцениваются в количественных шкалах, и значения этих параметров могут быть использованы в задачах классификации как информативные признаки для оценки пожарной обстановки.

В задачах прогнозирования и оценки состояния людей, находящихся в зоне действия пожара, основную информацию несут вредные химические вещества, время их воздействия на организм человека и температура.

При разработке метода синтеза выбранного класса математических моделей мы исходили из того, что значительное число типов пожаров может быть смоделировано в условиях полигонов с

созданием обучающих выборок, которые могут накапливаться в процессе обучения системы. Это делает возможным использование обучаемых нейронных сетей для распознавания характера и типа пожаров, причем в гораздо более широкой классификации, чем это принято в современной практике. Кроме того, процесс обучения в значительной степени позволяет снизить требования к техническим характеристикам используемых датчиков и к условиям измерения.

Для более детального изучения особенностей структуры данных, описывающих различные типы пожаров, нами проводился разведочный анализ в соответствии с общепринятой классификацией, который показал, что границы между искомыми классами носят нечеткий характер и требуют своего уточнения для формирования более адекватных и «тонких» управленческих решений.

Еще более сложную и неопределенную структуру имеют классы, характеризующие состояние здоровья людей, находящихся в зоне пожаров.

В этих условиях ввиду отсутствия обучающих репрезентативных выборок достаточного объема целесообразно использовать методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), разработанную в Юго-Западном государственном университете [7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14]. Основу этой методологии составляет совокупность методов синтеза нечетких решающих правил, ориентированных на определенные типы структуры данных. Выбор адекватных структуре данных методов синтеза производится в ходе разведочного анализа при взаимодействии естественного интеллекта специалистов исследуемой предметной области (пожарные, врачи, психологи и т. д.) с инженером, по знаниям владеющим методологией искусственного интеллекта. Знания, опыт и интуиция специалистов предметной области восполняют недостаток необходимых статистических данных и позволяют при взаимодействии с инженером-когнитологом строить формальные модели для плохоформализуемых задач.

Рациональное взаимодействие естественного и искусственного интеллекта обеспечивается алгоритмическим обеспечением МСГНРП [4; 8; 14].

Базовыми элементами синтезируемых нечетких моделей являются функции принадлежности $\mu_{\ell}(x_i)$ к исследуемым классам $\omega_{\ell}(\ell = 1, \dots, L)$ с базовыми переменными $x_i(i = 1, \dots, I)$, которые описывают состояние объекта исследования.

Основным фактором риска в районе пожаров, кроме температуры, является наличие вредных химических веществ. В работах [11; 15; 16] было показано, что в рамках МСГНРП оценку влияния вредных веществ на организм человека целесообразно производить с использованием следующего набора нечетких гибридных моделей.

Если имеется обучающаяся выборка по объему, соответствующему условиям применимости метода группового учета аргументов (МГУА), и имеются технические и технологические возможности определения резистивных концентраций вредных веществ с именем h_i (CO , CO_2 и т. д.), то в соответствии с рекомендациями [15; 16] синтезируется базовая переменная $Z_{\ell i}$ для функций принадлежности к классу состояний ω_{ℓ} для вещества с идентификатором i :

$$Z_{\ell i} = f_{\ell i} \left(\frac{c_i}{c_{pi}} \right) \cdot f_{\ell i}^* \left(\frac{t_i}{t_{pi}} \right) \quad (1)$$

где c_{pi} — резистентная концентрация химического вещества (ХВ) h_i , ниже которой обеспечивается безопасное функционирование органа по заболеванию ω_{ℓ} ;

t_{pi} – резистентное время, меньше которого орган «не успевает» перейти в патологию ω_ℓ ; $f_{ti}(\cdot)$ – нормировочная функция степени влияния ХВ с концентрацией c_i на появление и развитие заболеваний ω_ℓ с областью определения $[0, \dots, 1]$; $f_{ti}(\cdot)$ – нормировочная функция степени влияния времени воздействия ХВ h_i на появление и развитие патологии ω_ℓ с той же областью определения, что и $f_{ti}(\cdot)$; d – идентификатор решаемой задачи ($d = \text{п-прогноз}$; $d = \text{р-ранняя стадия}$; $d = \text{д-дифференциальный диагноз}$; $d = \text{с-степень тяжести заболевания}$).

Используя параметр Z_{ti} как базовую переменную, с учетом рекомендаций [7; 8; 9; 14] определяются функции принадлежности $\mu_\ell^d(Z_{ti})$, являющиеся частными решающими правилами для класса ω_ℓ по задаче d .

Уверенность UHR_ℓ^d в прогнозе появления заболеваний от факторов риска вредных химических веществ, находящихся в зоне пожара, определяется нечеткой функцией

$$UHR_\ell^d = Ag_\ell^d[\mu_\ell^d(Z_{ti})], \quad (2)$$

где Ag_ℓ^d – агрегатор функций принадлежности для класса ω_ℓ ; $i=1, 2, \dots$

Выбор формы и параметров функций принадлежности и способов их агрегации осуществляется в соответствии с общими рекомендациями МСГНРП [7; 10; 11; 15; 16].

Если c_{pi} неизвестны, то определяются средневзвешенные концентрации вредных веществ, порождаемых пожаром c_i , и в модели (1) c_{pi} заменяется предельно допустимой концентрацией (ПДК) c_{Pi} .

В условиях малых выборок и при готовности экспертов к построению нормирующих функций для выражения (1) и функций принадлежности для выражения (2) эксперты организуют свою работу в соответствии с рекомендациями [7].

Если в распоряжении экспертов имеется информация, «связывающая» уровни концентрации и время воздействия с состоянием организма человека, то в качестве базовой переменной для функций принадлежности к классу ω_ℓ следует выбрать отношение c_i/c_{pi} или c_i/c_{Pi} , а время воздействия учитывать с помощью поправочного коэффициента $\alpha_\ell(t)$.

Тогда частная уверенность в ω_ℓ по задаче d от воздействия вредного вещества h_i определяется выражением

$$U_{ti}^d = \mu_\ell^d(Q_i) \cdot \alpha_{ti}(t). \quad (3)$$

Для множества вредных веществ уверенность в ω_ℓ определяется выражением

$$UHR_\ell^d = Ag_\ell^d[\mu_\ell^d(Q_i)], \quad (4)$$

где Ag_ℓ^d – соответствующая функция агрегации; $Q_i = c_i/c_{pi}$ или $Q_i = c_i/c_{Pi}$.

В условиях недостаточной информации для построения графиков и аналитических выражений для моделей (1), (2) или (3), (4) строятся нечеткие решающие таблицы по заболеваниям ω_ℓ (одна таблица – одно заболевание), по строкам которых выписываются все существенные факторы риска в виде вредных химических веществ h_i . Столбцы таблицы разбиваются на два блока. Столбцы первого блока определяют интервал Δr отношений концентраций к ПДК ($\Delta r = c_{r-1} / c_{II} \div c_r / c_{II}$). Столбцы второго блока определяются интервалами времени Δt , в течение которых люди находятся под воздействием продуктов горения. Величины Δr и Δt выбираются экспертами исходя из целей и условий решаемых задач. Удобно в качестве ориентира выбрать формулы оценки интервалов, аналогично тому, как это делается при построении гистограмм распределения случайных величин. Элементами первого блока таблицы являются значения уверенности U_{iq} в том, что при определенной разности концентраций под воздействием фактора h_i появятся патологии ω_ℓ (q – номер интервала Δr).

Элементами второго блока таблицы являются временные поправочные коэффициенты γ_{ip} , уточняющие уверенности U_{iq} в появлении и развитии заболевания ω_ℓ в зависимости от времени воздействия факторов h_i (p – номер интервала Δt).

По каждой из строк уверенность в ω_ℓ определяется выражением

$$US_{\ell i} = U_{iq} \cdot \gamma_{ip}. \quad (5)$$

Общая уверенность в ω_ℓ от совокупности воздействия на организм человека химических факторов риска, связанных с пожаром, определяется выражением

$$UHR_\ell^d = F_\ell [U_{iq} \cdot \gamma_{ip}], \quad (6)$$

где F_ℓ – соответствующая функция агрегации.

Общие рекомендации по выбору величин уверенности U_{iq} поправочного коэффициента γ_{ip} и функции агрегации F_ℓ приведены в работах [7; 8; 11]. В этих же работах приведены примеры их получения на типах задач, аналогичных решаемым в данной работе.

Результаты и их обсуждение

С учетом особенностей решаемых задач и накопленного опыта по синтезу решающих правил в условиях нечеткой структуры данных и плохой формализации предлагается метод синтеза математических моделей оценки пожарной обстановки и состояния людей, находящихся в зоне пожара.

1. С учетом особенностей объекта исследования и возможных пожарных рисков определяются диапазоны контролируемых электромагнитных излучений, контролируемые химические вещества и температурные диапазоны, кото-

рые определяют пространство признаков для синтезируемых математических моделей.

2. В условиях полной определенности с типами пожаров, излучаемых электромагнитных диапазонов, выделяемого состава химических веществ решающие правила имеют традиционный продукционный вид:

$$\text{ЕСЛИ } Q_i \text{ ТО } R_i, \quad (7)$$

где Q_i – известная реакция датчиков, предполагаемых на выбранных типах платформ; R_i – принимаемые стандартные решения.

Правила типа (7) соответствуют общепринятым требованиям определяемыми руководящими документами и ГОСТами.

3. Если решается задача обучения системы на распознавание различных типов пожаров с нечетко определяемыми параметрами (заранее не известны возможные источники огня и его характеристики, высокий уровень помех, вызываемых, например, ярким солнечным светом, искусственным освещением и др.) и при отсутствии обучающих выборок достаточного объема, для синтеза соответствующих решающих правил предлагается использовать гибридные технологии обучения и, в частности, методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил с минимизацией пространства признаков и построением функций принадлежности к исследуе-

мым классам пожаров, которые агрегируются в искомые решающие правила [7; 11].

4. В условиях пункта 3 с учетом рекомендаций МСГНРП и квалиметрии создается экспертная группа специалистов в области пожарной безопасности, которая обучается приемам работы с нечеткими структурами данных. На первом этапе исследований эксперты выбирают максимально технически оправданное количество признаков x_i , описывающих возможные диапазоны электромагнитных волн, температур и видов вредных химических веществ, порождаемых возможными типами пожаров, включая дым. При наличии технических возможностей под выбранные информативные признаки подбирается группа датчиков с возможностью регистрации и запоминания результатов измерений. При высоком уровне помех (экранирование мест возгорания, яркий солнечный свет и т. д.) в состав информативных признаков целесообразно включить признаки, характеризующие отношение измеряемых параметров к регистрируемой или известной априори фоновой величине.

Производится моделирование пожарной обстановки при различных условиях возгораний и помех с измерением соответствующих признаков. На этом этапе исследований для оценки спектрального состава излучений удобно использовать универсальные широкополосные фотометры. С учетом общих рекомендаций МСГНРП, используя пакет

RUMM 2020, реализующий алгоритмы теории измерения латентных переменных, производится минимизация пространства признаков с получением списка информативных признаков, описывающего исследуемые классы пожарной обстановки.

5. В соответствии с рекомендациями МСГНРП производится построение функций принадлежности к исследуемым классам пожарной обстановки ω_p ($p = 1, \dots, P$), которые агрегируются в искомые решающие правила вида

$$UP_p = FP_p[\mu_p(x_i)], \quad (8)$$

где UP_p – уверенность в классификации пожарной обстановки с идентификатором p ; $\mu_p(x_i)$ – функции принадлежности к классу с именем p для базовой переменной (информативного пожарного признака) x_i ; FP_p – функция агрегации для класса ω_p .

6. При наличии репрезентативных обучающих выборок по классам пожаров ω_p , которые могут быть сформированы как в ходе моделирования пожарной обстановки, так и в процессе эксплуатации системы, модель типа (6) может быть уточнена обучением искусственной нейронной сети с последующим сравнением качества работы нейронной сети NP_p с UP_p . При этом возможны варианты оставления модели (7), перехода к нейронной сети NP_p , перехода к гибридной модели вида

$$GP_p = FG_p(UP_p, NP_p), \quad (9)$$

где GP_p – функция классификации гибридного типа; FG_p – соответствующая функция агрегации.

При использовании искусственных нейронных сетей в качестве одного из источников данных о пожарах могут быть применены видеокамеры, тогда процесс обучения будет проводиться как задача анализа сцен (распознавание видеоизображений пожаров).

Для уменьшения ложных срабатываний при обнаружении пожаров могут быть сформированы базы эталонных изображений пожарной обстановки, тогда принятие решений осуществляется сравнением реальной обстановки с эталонными образами. Этот тип решающих правил может быть агрегирован с моделью (9).

7. Если для оценки пожарной обстановки планируется использование нескольких неподвижных и (или) подвижных платформ, могут ставиться и решаться задачи уточнения координат возгорания, мониторинга динамики и (или) прогнозирования развития пожара. Например, если диагностическая платформа установлена на летающем роботе, то для уточнения координат пожара и его характера можно организовать движение аппарата в сторону максимального значения заданного параметра (концентрация CO , температура, интенсивность электромагнитного излучения). Вариант управления летающего робота по такому принципу описан в работе [1].

Для решения задачи прогноза развития определяется направление и скорость изменения значений выбранного параметра, возможно, с расчетом траектории движения платформы с датчиками с целью уточнения прогноза.

Для решения задач мониторинга динамики пожарной обстановки могут быть использованы модели мониторинга, описанные в работах [5; 6; 17; 18].

8. Синтез моделей прогнозирования и оценки состояния здоровья людей, находящихся в зоне действия пожара, осуществляется с использованием моделей (1), (2) или (3), (4). Для уточнения принимаемых решений в работах [7; 11; 15; 16] рекомендуется дополнительно использовать экологические и индивидуальные факторы риска. В этих же работах описан метод синтеза гибридных прогностических и диагностических моделей. Например, при наличии технических возможностей перед формированием команды, направляющейся в зону пожара, у людей могут быть оценены текущие значения функционального состояния, функционального резерва, защитная реакция организма, уровни текущего психоэмоционального напряжения и утомления [7; 10; 12; 13; 19; 20; 21; 22].

В работах [11; 20; 23; 24] показано, как эти показатели могут быть оценены по энергетической реакции биологически активных точек.

Используя разработанный метод синтеза, были получены решающие правила оценки состояния людей в зоне распространения угарного газа. При этом

использовалась традиционная классификация степени тяжести отравления: отравление практически отсутствует (класс норма ω_n); легкая степень отравления – ω_l ; средняя степень отравления – ω_c ; тяжелая степень отравления, приводящая к коме, – ω_T ; критическая степень отравления, приводящая к смерти, – ω_K .

По этим классам состояний были получены нечеткие модели оценки уверенности в наличии искомой степени отравления:

$$U_H = \mu_H(Q_{CO}) \cdot \alpha_H(t);$$

$$U_L = \mu_L(Q_{CO}) \cdot \alpha_L(t);$$

$$U_C = \mu_C(Q_{CO}) \cdot \alpha_C(t);$$

$$U_T = \mu_T(Q_{CO}) \cdot \alpha_T(t);$$

$$U_K = \mu_K(Q_{CO}),$$

где U_ℓ – уверенность в степени отравления по классу ω_ℓ ($\ell = H, L, C, T, K$); $\mu_\ell(Q_\omega)$ – функция принадлежности к классу ω_ℓ с базовой переменной Q_{CO} ; $Q_{CO} = C_{CO}/C_{PCO}$; C_{CO} – измеренная концентрация в мг/л; C_{PCO} – предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны ($C_{PCO} = 0,02$ мг/л); $\alpha_\ell(t)$ – поправочный коэффициент (нормирующий временной множитель), позволяющий учитывать время воздействия СО на организм человека.

Следует отметить, что при расчете U_K поправочный коэффициент по времени не вводится, поскольку для концентраций этого класса степени тяжести критическое состояние и смерть наступают

пают в течение нескольких минут. Принятие решений в пользу класса ω_ℓ принимается по максимальному значению показателя U_ℓ .

В ходе проводимого математического моделирования и экспертного оценивания было показано, что уверенность в правильной классификации с использованием полученных моделей превышает величину 0,92.

Выводы

В ходе проведенных исследований было показано, что для повышения надежности оценки пожарной безопасности необходимо использовать три группы датчиков, измеряющих интенсивность электромагнитных излучений в диапазонах ультрафиолетового, видимого и инфракрасного спектров, химического состава (угарного газа, двуокиси углерода, фенолов и др.) и температуры.

При этом в общем виде классификация типов и характера пожаров носит нечеткий характер с пересекающейся структурой классов.

Такой же характер носят задачи прогнозирования оценки состояния людей, находящихся или направляемых в зону пожаров.

С учетом этих обстоятельств в работе предложен метод синтеза математических моделей оценки пожарной обстановки и состояния здоровья людей, находящихся в зоне пожара на основе методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил, в сочетании с нейросетевыми технологиями.

Практическое применение этого метода позволяет создавать высокоточные системы оценки пожарной обстановки и состояния людей в зоне исследуемого класса чрезвычайных ситуаций, размещающихся на подвижных и неподвижных платформах.

Список литературы

1. Автоматизированная система контроля окружающей среды и оценки состояния людей в условиях чрезвычайных ситуаций с использованием летающего робота / С. Ф. Яцун, Н. А. Корневский, С. В. Ефимов, Е. Н. Коровин // Медицинская техника. 2018. № 4. С. 52-54.
2. Поляков Р. Ю., Ефимов С. В., Яцун С. Ф. Метод раннего обнаружения пожара с помощью мобильных газовых пожарных извещателей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. № 1 (70). С. 81-89.
3. Поляков Р. Ю. Мобильная приборная платформа для системы экологического мониторинга загрязнения токсичными газами атмосферного воздуха: дис. ... канд. техн. наук. Курск, 2019. 165 с.

4. Титов Д. В. Разработка и исследование методов, алгоритмов и технических средств обработки спектрозональных изображений: дис. ... канд. техн. наук. Курск, 2018. 325 с.
5. Математическая модель развития пожара в системе помещений / Д. В. Тараканов, С. В. Федосов, А. М. Ибрагимов [и др.] // Вестник МГСУ. 2013. № 4. С. 121–128.
6. Тараканов Д. В., Семенов А. О., Баканов М. О. Модели мониторинга и управления при ликвидации крупных пожаров: монография. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. 128 с.
7. Корневский Н. А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.
8. Корневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1 (289). С. 33–35.
9. Корневский Н. А., Разумова К. В. Синтез нечетких классификационных правил в многомерном пространстве признаков для медицинских // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2-1. С. 223–227.
10. Корневский Н. А., Туттов Н. Д., Лазурина Л. П. Проектирование медико-экологических информационных систем / Курский государственный технический университет. Курск, 2001. 193 с.
11. Синтез нечетких решающих правил для прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, вызываемых состоянием окружающей среды, с учетом индивидуальных особенностей организма / Н. А. Корневский, Ю. А. Иванков, Е. А. Яковлева, Н. Н. Савченко // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2007. Т. 6, № 2. С. 395–400.
12. Корневский Н. А., Коптева Н. А., Крупчатников Р. А. Прогнозирование и ранняя диагностика заболеваний сельскохозяйственных рабочих на основе нечеткой логики принятия решений // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2008. Т. 4, № 7. С. 86–89.
13. Корневский Н. А., Башир А. С., Горбатенко С. А. Синтез гибридных нечетких правил для прогнозирования, оценки и управления состоянием здоровья в экологически неблагоприятных регионах // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 4. С. 69–73.
14. Korenevskiy N. A. Application of Fuzzy Logic for Decision-Making in Medical Expert Systems // Biomedical Engineering. 2015. Vol. 49. P. 46–49.

15. Метод синтеза нечетких моделей и ранней диагностики профессиональных заболеваний работников гальванических производств / Н. А. Кореневский, И. Ю. Григоров, Т. Н. Говорухина, Р. А. Крупчатников // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 3. С. 163-169.

16. Степашов Р. В. Метод, модели и алгоритм прогнозирования и ранней диагностики профессиональных заболеваний работников агропромышленного комплекса, контактирующих с ядохимикатами, на основе гибридных нечетких технологий: дис. ... канд. техн. наук. Курск, 2018. 144 с.

17. Алгоритм прогнозирования температуры газовой среды в здании при пожаре по данным мониторинга / Н. Г. Топольский, Д. В. Тараканов, Е. С. Варламов [и др.] // Технологии техносферной безопасности. 2014. № 4 (56). С. 6.

18. Варламов Е. С., Бобков С. П., Тараканов Д. В. Об оценке динамики температуры газовой среды пожара в здании по ее мониторингу в смежной зоне // Технологии техносферной безопасности. 2016. № 3 (67). С. 107-111.

19. Лукашов М. И., Кореневский Н. А., Еремин А. В. Определение уровня длительного физического утомления как фактора риска рецидивов хронических заболеваний // Биомедицинская радиоэлектроника. 2009. № 5. С. 10-15.

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

21. Fuzzy Determination of The Humans Level of Psycho-Emotional / N. Korenevskiy, Riad Taha Al-Kasasbeh, F. Ionescou, M. Alshamasin, Anrew P. Smit // Mega-Conference on Biomedical Engineering: Proceedings of the 4th-international conferecejn the develpment of biomedical engineering. Ho Chi Minh City, 2012. P. 354-357.

22. Fuzzy determination of the human's level of psycho-emotional / N. A. Korenevskiy, R. T. Al-Kasasbeh, F. Ionescou, M. Alshamasin, E. Alkasasbeh, A. P. Smith // IFMBE Proceedings. 2013. Vol. 40. P. 213-216.

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

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

References

1. Yatsun S. F., Korenevsky N. A., Efimov S. V., Korovin E. N. Avtomatizirovannaya sistema kontrolya okruzhayushchei sredy i otsenki sostoya-niya lyudei v usloviyakh chrezvychaynykh situatsii s ispol'zovaniem letayushchego robota [Automated system for monitoring the environment and assessing the condition of people in emergency situations using a flying robot]. *Meditsinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2018, no. 4, pp. 52-54.
2. Polyakov R. Yu., Efimov S. V., Yatsun S. F. Metod rannego obnaruzheniya pozhara s pomoshch'yu mobil'nykh gazovykh pozharnykh izveshchatelei [Method of early fire detection using mobile gas fire detectors]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2017, no. 1 (70), pp. 81-89.
3. Polyakov R. Yu. Mobil'naya pribornaya platforma dlya sistemy ekologicheskogo monitoringa zagryazneniya toksichnymi gazami atmosfernogo vozdukha. Diss. kand. tekhn. nauk [Mobile instrument platform for the system of environmental monitoring of pollution by toxic gases of atmospheric air. Cand. techn. sci. diss.]. Kursk, 2019. 165 p.
4. Titov D. V. Razrabotka i issledovanie metodov, algoritmov i tekhnicheskikh sredstv obrabotki spektrozonal'nykh izobrazhenii. Diss. kand. tekhn. nauk [Development and research of methods, algorithms and technical means for processing spectrosonal images. Dr. techn. sci. diss.]. Kursk, 2018. 325 p.
5. Tarakanov D. V., Fedosov S. V., Ibragimov A. M., eds. Matematicheskaya model' razvitiya pozhara v sisteme pomeshchenii [Mathematical model of fire development in the system of premises]. *Vestnik MGSU = Bulletin of MGSU*, 2013, no. 4, pp. 121-128.
6. Tarakanov D. V., Semenov A. O., Bakanov M. O. Modeli monitoringa i upravleniya pri likvidatsii krupnykh pozharov [Models of monitoring and management in the liquidation of large fires]. Ivanovo, Ivanovskaya pozharno-spasatel'naya akademiya GPS MChS Rossii Publ., 2018. 128 p.
7. Korenevskiy N. A., Rodionova S. N., Khripina I. I. Metodologiya sinteza gibridnykh nechetkikh reshayushchikh pravil dlya meditsinskikh intellektual'nykh sistem podderzhki prinyatiya reshenii [Methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems]. Stary Oskol, TNT Publ., 2019. 472 p.
8. Korenevskiy N. A. Ispol'zovanie nechetkoi logiki prinyatiya reshenii dlya meditsinskikh ekspertnykh sistem [Using fuzzy logic of decision-making for medical expert systems]. *Meditsinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2015, no. 1 (289), pp. 33-35.
9. Korenevsky N. A., Razumova K. V. Sintez nechetkikh klassifikatsionnykh pravil v mnogomernom prostranstve priznakov dlya meditsinskikh [Synthesis of fuzzy classification rules in a multidimensional feature space for medical applications]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwestern State University. Series:*

Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation, 2012, no. 2-1, pp. 223-227.

10. Korenevsky N. A., Tutov N. D., Lazurina L. P. *Proektirovanie mediko-ekologicheskikh informatsionnykh sistem* [Designing of medical and ecological information systems]. Kursk, Kursk State Technical University Publ., 2001. 193 p.

11. Korenevsky N. A., Ivankov Yu. A., Yakovleva E. A., Savchenko N. N. *Sintez nechetkikh reshayushchikh pravil dlya prognozirovaniya i rannei diagno-stiki zabolevaniy, vyzываемых состоянием окружающей среды, с учетом индивидуаль'nykh osobennostey organizma* [Synthesis of fuzzy decision rules for forecasting and early diagnosis of diseases caused by the state of the environment, taking into account the individual characteristics of the body]. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2007, vol. 6. no. 2, pp. 395-400.

12. Korenevsky N. A., Kopteva N. A., Krupchatnikov R. A. *Prognozirovaniye i rannyya diagnostika zabolevaniy sel'skokhozyaistvennykh rabochikh na osnove nechetkoi logiki prinyatiya reshenii* [Forecasting and early diagnosis of diseases of agricultural workers on the basis of fuzzy logic of decision-making]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2008, vol. 4, no. 7, pp. 86-89.

13. Korenevsky N. A., Bashir A. S., Gorbatenko S. A. *Sintez gibridnykh nechetkikh pravil dlya prognozirovaniya, otsenki i upravleniya sostoyaniem zdorov'ya v ekologicheskii neblagopriyatnykh regionakh* [Synthesis of hybrid fuzzy rules for forecasting, assessment and management of health status in environmentally unfavorable regions]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation*, 2013, no. 4, pp. 69-73.

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

15. Korenevsky N. A., Grigorov I. Yu., Govorukhina T. N., Krupchatnikov R. A. *Metod sinteza nechetkikh modelei i rannei diagnostiki professional'nykh zabolevaniy rabotnikov gal'vanicheskikh proizvodstv* [Method of synthesis of fuzzy models and early diagnosis of occupational diseases of electroplating production workers]. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2019, vol. 18, no. 3, pp. 163-169.

16. Stepashov R. V. *Metod, modeli i algoritm prognozirovaniya i rannei diagnostiki professional'nykh zabolevaniy rabotnikov agropromyshlennogo kompleksa, kontaktiruyushchikh s yadokhimikatami, na osnove gibridnykh nechetkikh tekhnologii*. Diss. kand. tekhn. nauk

[Method, models and algorithm for forecasting and early diagnosis of occupational diseases of agricultural workers in contact with pesticides, based on hybrid fuzzy technologies. Dr. techn. sci. diss.]. Kursk, 2018. 144 p.

17. Tarakanov D. V., Topolsky N. G., Varlamov E. S., eds. Algoritm prognozirovaniya temperatury gazovoi sredy v zdanii pri pozhare po dannym monitoringa [Algorithm for predicting the temperature of the gas environment in a building during a fire according to monitoring data]. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti = Technosphere Safety Technologies*, 2014, no. 4 (56), p. 6.

18. Tarakanov D. V., Bobkov S. P., Varlamov E. S. Ob otsenke dinamiki temperatury gazovoi sredy pozhara v zdanii po ee monitoringu v smezhnoi zone [On the assessment of the dynamics of the temperature of the gas environment of a fire in a building by monitoring it in an adjacent zone]. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti = Technosphere safety technologies*, 2016, no. 3 (67), pp. 107-111.

19. Lukashov M. I., Korenevsky N. A., Eremin A. V. Opreделение urovnya dlitel'nogo fizicheskogo utomleniya kak faktora riska retsidivov khronicheskikh zablevaniy [Determination of the level of prolonged physical fatigue as a risk factor for relapses of chronic diseases]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2009, no. 5, pp. 10-15.

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

21. Korenevskiy N., Al-Kasasbeh R. T., Ionescou F., Alshamasin M., Smit A. P. Fuzzy Determination of The Humans Level of Psycho-Emotional. Mega-Conference on Biomedical Engineering. Proceedings of the 4th-international conferecejn the develjpmnt of biomedical engineering. Ho Chi Minh City, 2012, pp. 354-357.

22. Korenevskiy N. A., Al-Kasasbeh R. T., Ionescou F., Alshamasin M., Alkasasbeh E., Smith A. P. Fuzzy determination of the human's level of psycho-emotional. IFMBE Proceedings, 2013, vol. 40, pp. 213-216.

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

24. Bunyaev V. V., Korenevsk N. A. Metody poiska informativnykh proeksionnykh zon i sinteza nechetkikh reshayushchikh pravil dlya refleksodiagnostiki [Methods of searching for informative projection zones and synthesis of fuzzy decision rules for reflexology]. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2004, vol. 3, no. 3, pp. 175-178.

Информация об авторах / Information about the Authors

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

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

Шевцов Максим Викторович, начальник отделения организации практик, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: shevtsovmv@mail.ru

Maxim V. Shevtsov, Head of the Department of the Organization of Practices, Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation, e-mail: shevtsovmv@mail.ru

Стародубцева Лилия Викторовна, доцент кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: lilja-74@inbox.ru

Lilia V. Starodubtseva, Associate Professor of the Department of Technical Education, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: lilja-74@inbox.ru

Сипливый Геннадий Вячеславович, профессор кафедры урологии, Курский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, e-mail: siqena2005@yandex.ru

Gennady V. Siplivy, Professor of the Department of Urology, Kursk State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Kursk, Russian Federation, e-mail: siqena2005@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.396.933

Методика оценивания времени подготовки возвращаемой ступени ракеты космического назначения к повторному пуску на примере ракеты-носителя FALCON 9 FT

С. Ф. Стельмах¹, В. Г. Андронов², Д. С. Коптев² ✉

¹ Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского Министерства обороны Российской Федерации
ул. Ждановская 13, г. Санкт-Петербург 197198, Российская Федерация

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

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Резюме

Целью исследования является предложение методики оценивания времени подготовки возвращаемой ступени ракеты космического назначения к повторному пуску на основе t -распределения Стьюдента с использованием гамма-функции Эйлера.

Методы. Статистический анализ динамики повторных пусков первой ступени ракеты носителя (РН) Falcon 9 показал, что первый повторный пуск возвращаемой ступени В 1046.2 осуществлен 7 августа 2018 г. через 88 дней после ее посадки на морскую платформу OCISLY. Всего в период с 2018 по 2020 гг. состоялось 3 повторных пуска этой ступени. Средний интервал времени, требуемый на подготовку данной ступени к последующему пуску, составил 205 дней. Ступень В 1058, впервые стартовавшая в мае 2020 г., запускалась повторно 6 раза (последний раз – в марте 2021 г.). Средний интервал времени, требуемый на подготовку данной ступени к последующему пуску, составил 50 дней. Анализ имеющихся данных показывает, что с момента первого повторного пуска ступени в августе 2018 г. по настоящее время – среднее время подготовки возвращаемых ступеней к следующему пуску сократилось в четыре раза – с 205 дней до 45–50 дней.

Результаты. Применение предлагаемой методики к выборке интервалов времени подготовки к повторному пуску ступеней В1056, В1058, В1059, В1060 в период с 2019 по 2021 гг., позволяет получить следующие значения времени подготовки возвращаемой ступени ракеты космического назначения к повторному пуску: $t = 55 \pm 10$ суток, т. е. $t \in (45; 65)$ суток, что подтверждается анализом представленных статистических данных. Расхождение результатов расчетов с реальными данными находится в пределах статистической погрешности.

Заключение. Представленная методика позволяет оценивать среднее время, необходимое для подготовки возвращаемых ступеней РН к последующим пускам, а следовательно, спрогнозировать возможности участников космической деятельности, имеющих в своем распоряжении многоразовые космические системы по наращиванию их орбитальных группировок. Следовательно, предложенная методика может быть использована при разработке алгоритмов, моделей, методов оценки времени подготовки возвращаемых ступеней к повторным пускам РН, а также для оценки эффективности применения многоразовых (частично спасаемых) РН различных классов по предназначению.

© Стельмах С. Ф., Андронов В. Г., Коптев Д. С., 2021

Ключевые слова: ракета-носитель; статистика повторных пусков возвращаемой ступени ракеты-носителя; время подготовки возвращаемой ступени ракеты-носителя к повторному пуску.

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

Для цитирования: Стедьмах С. Ф., Андронов В. Г., Коптев Д. С. Методика оценивания времени подготовки возвращаемой ступени ракеты космического назначения к повторному пуску на примере ракеты-носителя FALCON 9 FT // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 3. С. 160–179.

Поступила в редакцию 16.07.2021

Подписана в печать 14.08.2021

Опубликована 30.09.2021

Methodology for Estimating the Preparation Time of the Return Stage of a Space Rocket for Re-Launch Using the Example of the FALCON 9 FT Launch Vehicle

Stanislav F. Stelmakh¹, Vladimir G. Andronov², Dmitry S. Koptev² ✉

¹ Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky of the Ministry of Defense of the Russian Federation
13 Zhdanovskaya str., St. Petersburg 197198, Russian Federation

² 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 to propose a methodology for estimating the preparation time of the return stage of a space rocket for re-launch based on the Student's *t*-distribution using the Euler gamma function.

Methods. Statistical analysis of the dynamics of repeated launches of the first stage of the Falcon 9 launch vehicle (PH) showed that the first re-launch of the return stage was at 1046.2 was carried out on August 7, 2018, 88 days after her landing on the OCISLY offshore platform. In total, 3 re-launches of this stage took place in the period from 2018 to 2020. The average time interval required to prepare this stage for subsequent launch was 205 days. The 1058 stage, which was first launched in May 2020, was re-launched 6 times (the last time was in March 2021). The average time interval required to prepare this stage for subsequent launch was 50 days. Analysis of the available data shows that from the moment of the first re-launch of the stage in August 2018 to the present, the average preparation time of the returned stages for the next launch has decreased fourfold – from 205 days to 45-50 days.

Results. The application of the proposed methodology to the sampling of the time intervals of preparation for the re-launch of stages B1056, B1058, B1059, B1060 in the period from 2019 to 2021, allows us to obtain the following values of the time of preparation of the returned stage of a space rocket for re-launch: $t = 55 \pm 10$ days, i.e. t (45; 65) days, which is confirmed by the analysis of the presented statistical data. The discrepancy between the calculation results and real data is within the statistical error.

Conclusion. The presented methodology makes it possible to estimate the average time required to prepare the return stages of the launch vehicle for subsequent launches, and, consequently, to predict the capabilities of participants in space activities who have reusable space systems at their disposal to increase their orbital groupings. Therefore, the proposed methodology can be used in the development of algorithms, models, methods for estimating the preparation time of the returned stages for re-launches of the PH, as well as for evaluating the effectiveness of the use of reusable (partially salvageable) PH of various classes for their intended purpose.

Keywords: launch vehicle; statistics of repeated launches of the return stage of the launch vehicle; preparation time of the return stage of the launch vehicle for re-launch.

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

For citation: Stelmakh S. F., Andronov V. G., Koptev D. S. Methodology for Estimating the Preparation Time of the Return Stage of a space Rocket for re-launch on the Example of the FALCON 9 FT Launch Vehicle. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2021; 11(3): 160–179. (In Russ.)

Received 16.07.2021

Accepted 14.08.2021

Published 30.09.2021

Введение

Основными критериями конкурентоспособности ракет-носителей (РН) являются масса полезного груза (ПГ), выводимого на различные орбиты, простота конструкции, экологическая безопасность, надежность и стоимость пуска. Одним из основных способов уменьшения стоимости вывода ПГ на орбиты является многоразовое использование оборудования РН [1]. Наиболее дорогостоящими составными частями РН являются узлы и агрегаты первой ступени, к основным из которых относятся двигательные установки (ДУ), топливные баки, корпус, системы управления, энергопитания и другие компоненты. По мнению российских и зарубежных экспертов, спасаемые (многоразовые) ракетные блоки позволяют существенно снизить стоимость пусков РН [2; 3; 4].

В настоящее время подавляющее большинство космических держав и частных компаний предпринимают активные шаги по разработке многоразовых космических систем. Лидером в этом направлении являются США. К основным результатам программ разра-

ботки и практического применения многоразовых космических систем можно отнести такие американские РН, как Falcon 9 FT, Falcon Heavy, Starship, Shepard, New Glenn, Electron и другие. Необходимо отметить, что Falcon 9 FT, Falcon Heavy, Electron уже несколько лет находятся в стадии серийного производства и эксплуатации [5; 6; 7; 8; 9; 10].

В результате повторного применения многоразовых ступеней РН существенно снижается не только стоимость запусков ПГ, но и сокращается общее время производства и подготовки ракеты космического назначения к пуску, т. к. нет необходимости в изготовлении двигателей, корпусов, топливных баков, других узлов и агрегатов, используемых повторно [11].

Поэтому разработка методики, позволяющей оценить среднее время, необходимое для подготовки возвращаемых ступеней РН к последующим пускам, а следовательно, спрогнозировать возможности участников космической деятельности, имеющих в своем распоряжении многоразовые космические системы, по наращиванию их орбитальных группировок не только в мирное время,

но и в особый период является актуальной.

Материалы и методы

Falcon 9 FT – семейство двухступенчатых одноразовых и частично многоразовых РН американской частной компании Space X (рис. 1) [12].



Рис. 1. Облик РН Falcon 9 FT

Fig. 1. The appearance of the Falcon 9 FT launch vehicle

В качестве горючего для в Falcon 9 FT используют керосин, а в качестве окислителя – жидкий кислород. Предназначена для запусков коммерческих спутников связи и навигации, научно-исследовательских космических аппаратов (КА), спутников военного назначения, грузовых и пилотируемых кораблей Dragon [13].

Основные характеристики РН Falcon 9 FT представлены ниже (табл. 1).

Рекордной по массе полезной нагрузкой, выведенной Falcon 9 FT на низкую околоземную орбиту, является связка из 60 спутников Starlink общей массой 15,6 т. Максимальной по массе полезной нагрузкой, выведенной данной РН на геопереходную орбиту, является спутник Telstar 19 Vantage (7,075 т).

Таблица 1. Основные характеристики РН Falcon 9 FT

Table 1. The main characteristics of the Falcon 9 FT carrier rocket

Характеристика (параметр)	Количественный показатель	Примечание
Количество ступеней	2	
Длина, м	70	
Диаметр, м	3,7	
Стартовая масса, т	549	
Масса полезной нагрузки, т НОО / ГПО	15,6 (с возвращением 1-й ступени), 22,8 (без возвращения) / (5,5 – 8,3)	
Стартовые площадки	SLC-40 (мыс Канаверал) LC-39A (КЦ Кеннеди)	Вывод ПГ на орбиты с наклонением 26°-146°
	SLC-4 (авиабаза Ванденберг)	Вывод ПГ на орбиты с наклонением 70°-104°

Окончание табл. 1 / Table 1 (ending)

Характеристика (параметр)	Количественный показатель	Примечание
Число запусков всего (успешных (с возвращением первой ступени)) / неудачных	111 (103 (71)) / 8	Повторных запусков первой ступени 54
Места посадок	Посадочная зона №1	Канаверал
	Морские платформы OCISLY, JRTI	Атлантический океан
	Посадочная зона № 4	Ванденберг
Характеристики первой ступени		
Сухая масса, т	22,2	
Стартовая масса, т	431,7	
Маршевые двигатели	Merlin 1D+	9 шт.
Характеристики двигателя Тяга, кН Удельный импульс, с	В воздухе 780 / В пустоте 854 В воздухе 282 / В пустоте 311	
Тип топлива	Керосин+ЖК	
Кратность применения	10	
Характеристики второй ступени		
Сухая масса, т	4	
Стартовая масса, т	111,5	
Маршевый двигатель	Merlin 1D+Vacuum	1 шт.
Характеристики двигателя Тяга, кН Удельный импульс, с	В пустоте 981 В пустоте 342	
Тип топлива	Керосин+ЖК	
Стоимость запуска, млн долл.	62	Коммерческие запуски
	92	Запуски в интересах МО США и др. правительственных заказчиков

Первая ступень Falcon 9 FT используется повторно. Для посадки на морские платформы (рис. 2), находящиеся в Атлантическом океане на значительном удалении от стартовых площадок или на посадочные площадки, находящиеся на суше вблизи от стартовых комплексов, первая ступень имеет четыре аэродинамических решетчатых руля для стабилизации на возвратном участке траектории и четыре раскладывающиеся посадочные опоры.

Первое успешное приземление возвращаемой ступени РН на площадку по-

садочной зоны на мысе Канаверал состоялось в декабре 2015 г. В апреле 2016 г. первая ступень Falcon 9 впервые успешно приземлилась на морскую платформу, находящуюся в Атлантическом океане. В марте 2017 г. та же ступень после технического обслуживания была запущена повторно и снова успешно приземлилась на морскую платформу. С 2010 г. по настоящее время произведено 117 пусков РН семейства Falcon 9, в которых возвращаемые ступени запускались повторно 60 раз.

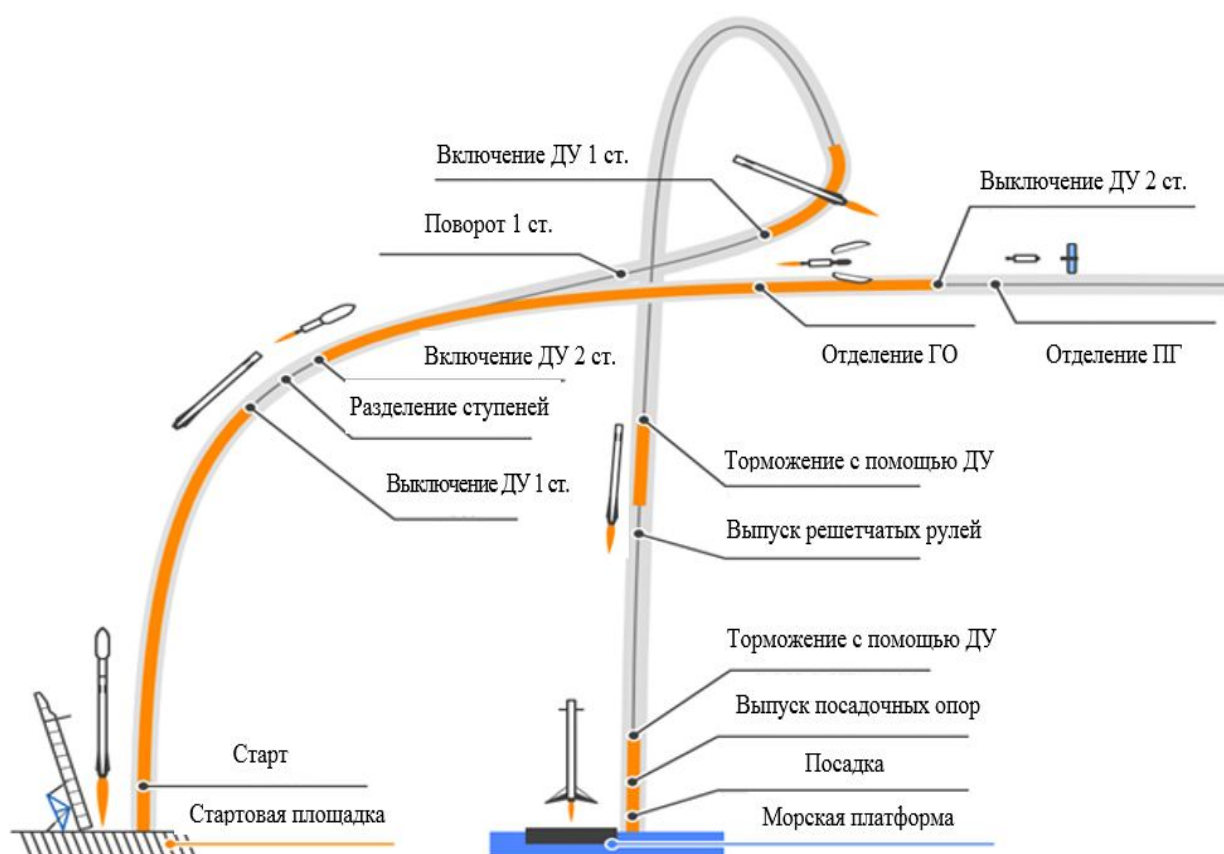


Рис. 2. Схема посадки первой ступени РН Falcon 9 FT на морскую платформу

Fig. 2. Scheme of landing of the first stage of the Falcon 9 FT carrier rocket on the offshore platform

Статистика повторных пусков первых ступеней (блок 5) РН Falcon

9 FT представлена в таблице 2 [14; 15].

Таблица 2. Статистика повторных пусков первых ступеней РН Falcon 9 FT (блок 5)**Table 2.** Statistics of re-launches of the first stages of the Falcon 9 FT carrier rocket (block 5)

Номер ступени	Дата пуска	Номер пуска	Время подготовки ступени к повторному пуску, дни	Среднее время подготовки ступени к повторному пуску, дни
B1046	11.5.18	1	-	205
	7.8.18	2	88	
	3.12.18	3	117	
	18.1.20	4	411	
B1047	22.7.18	1	-	190
	15.11.18	2	116	
	6.8.19	3	263	
B1048	25.7.18	1	-	151
	8.10.18	2	75	
	22.2.19	3	137	
	11.11.19	4	262	
	18.3.20	5	128	
B1049	10.9.18	1	-	105
	11.1.19	2	123	
	24.5.19	3	133	
	7.1.20	4	228	
	4.6.20	5	149	
	18.8.20	6	75	
	25.11.20	7	99	
	4.3.21	8	98	
B1051	2.3.19	1	-	93
	12.6.19	2	102	
	29.1.20	3	231	
	22.4.20	4	84	
	7.8.20	5	107	
	18.10.20	6	72	
	13.12.20	7	55	
	20.1.21	8	37	
	14.3.21	9	52	
B1056	4.5.19	1	-	96
	25.7.19	2	82	
	17.12.19	3	145	
	17.2.20	4	62	

Окончание табл. 2 / Table 2 (ending)

Номер ступени	Дата пуска	Номер пуска	Время подготовки ступени к повторному пуску, дни	Среднее время подготовки ступени к повторному пуску, дни
В1058	30.5.20	1	-	50
	20.7.20	2	51	
	6.10.20	3	47	
	5.12.20	4	60	
	24.1.21	5	49	
	11.3.21	6	45	
В1059	5.12.19	1	-	87
	7.3.20	2	93	
	13.6.20	3	98	
	30.8.20	4	78	
	19.12.20	5	110	
	16.2.21	6	59	
В1060	30.6.20	1	-	54
	3.9.20	2	64	
	24.10.20	3	51	
	8.1.21	4	75	
	4.2.21	5	27	

Динамика повторных пусков первых ступеней РН Falcon 9 FT (блок 5) представлена ниже (рис. 3).

Анализ динамики повторных пусков первой ступени РН Falcon 9 показывает следующее. Первый повторный пуск возвращаемой ступени В 1046.2 был осуществлен 7 августа 2018 г. через 88 дней после ее посадки на морскую платформу OCISLY. Всего в период с 2018 по 2020 гг. состоялось 3 повторных пуска этой ступени. Средний интервал

времени, требуемый на подготовку данной ступени к последующему пуску, составил 205 дней. Ступень В 1058, впервые стартовавшая в мае 2020 г., запускалась повторно 6 раза (последний раз – в марте 2021 г.). Средний интервал времени, требуемый на подготовку данной ступени к последующему пуску, составил 50 дней.

Диаграмма, отражающая динамику изменения среднего времени подготовки первой ступени РН Falcon 9 FT к повторному пуску, представлена на рисунке 4.

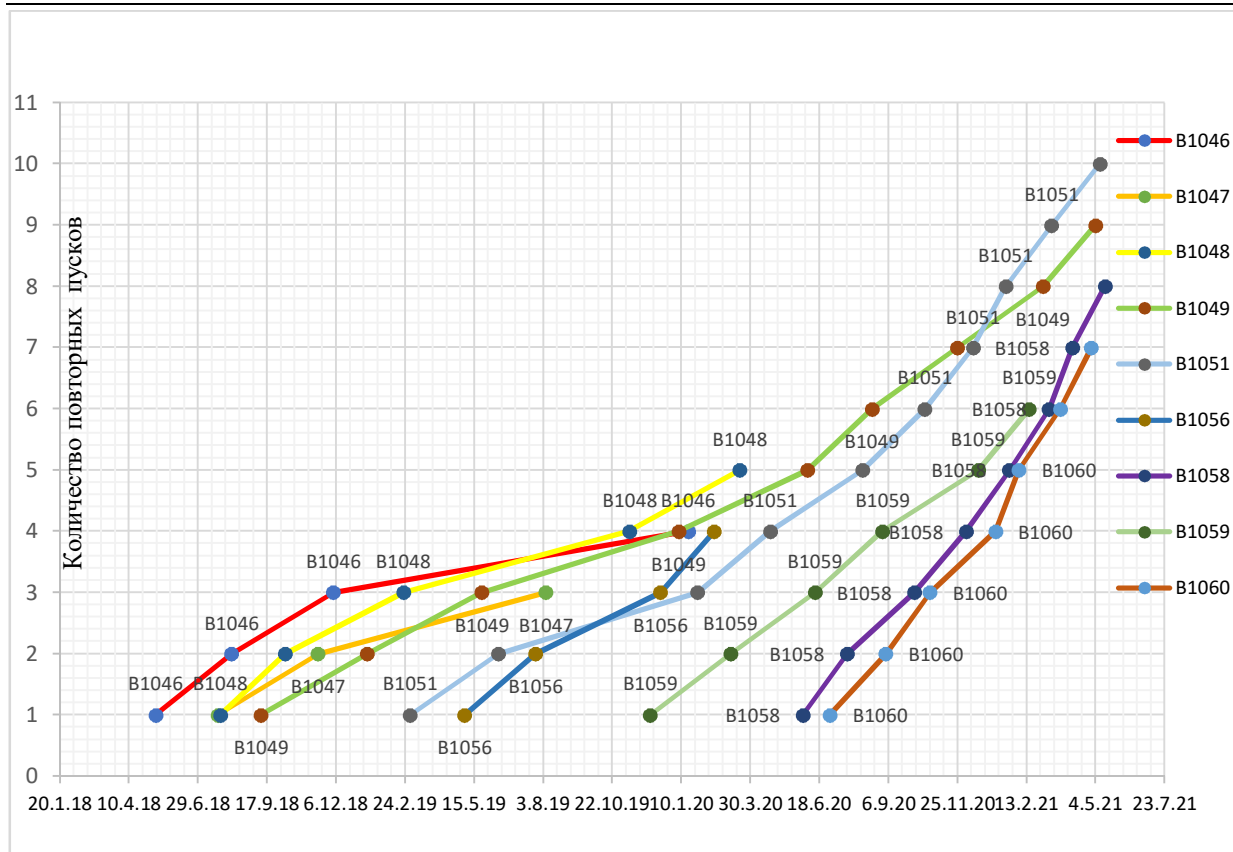


Рис. 3. Динамика повторных пусков первой ступени PH Falcon 9 FT (блок 5)

Fig. 3. Dynamics of repeated launches of the first stage of the Falcon 9 FT launch vehicle (block 5)

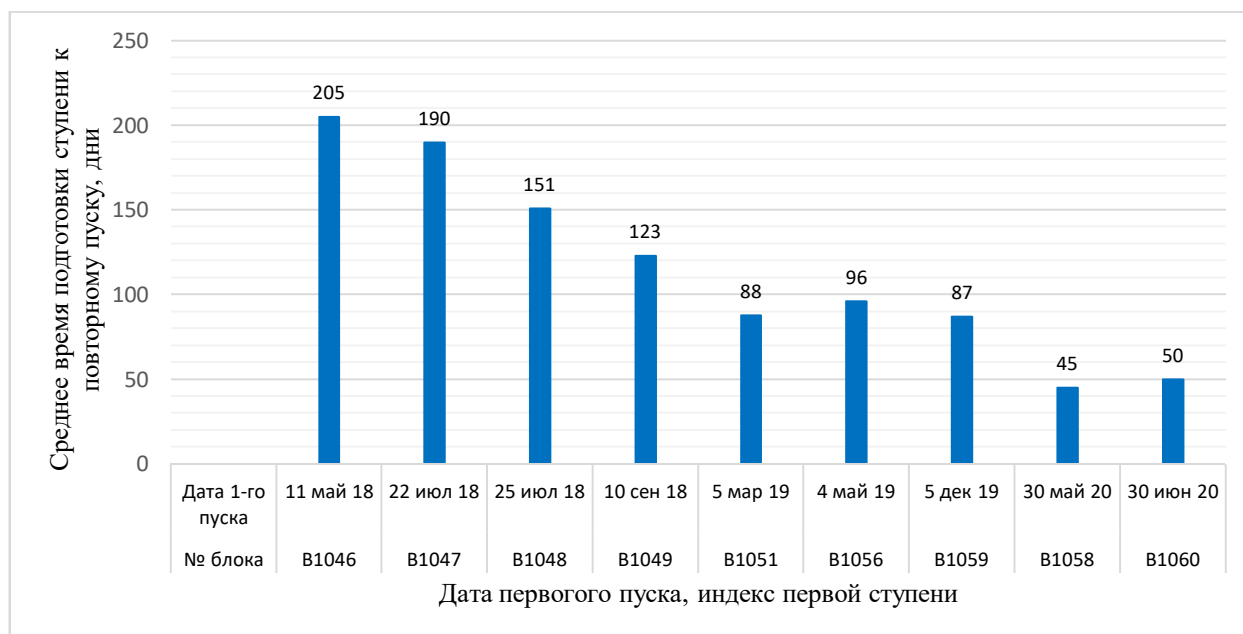


Рис. 4. Динамика изменения среднего времени подготовки первой ступени PH Falcon 9 FT (блок 5) к повторному пуску

Fig. 4. Dynamics of changes in the average time of preparation of the first stage of the Falcon 9 FT carrier rocket (block 5) for re-launch

Анализ данных, представленных на указанных диаграммах (см. рис. 3, 4), показывает, что с момента первого повторного пуска ступени в августе 2018 г. по настоящее время среднее время подготовки возвращаемых ступеней к следующему пуску сократилось в четыре раза – с 205 дней до 45–50 дней.

Изучение существующей литературы показывает, что в указанные временные периоды при подготовке РН Falcon 9 к пуску с повторным использованием первой ступени выполняется следующий перечень основных технологических операций [16; 17].

В случае посадки возвращаемой ступени на морскую платформу:

- захват и удержание ступени на платформе с помощью робота Octagraper;
- вентиляция топливных баков;
- высадка обслуживающего персонала с корабля поддержки на платформу, закрепление посадочных опор на палубе платформы в целях предотвращения падения ступени из-за качки на волнах;
- транспортировка ступени в порт (ступень располагается на платформе в вертикальном положении);
- перегрузка ступени краном с морской платформы на специальный стенд, располагающийся на пирсе и позволяющий отсоединить посадочные опоры и решетчатые рули от вертикально расположенной на стенде ступени;

– перегрузка ступени краном со стенда из вертикального положения в горизонтальное положение на специальную платформу;

– транспортировка ступени на технический комплекс;

– на техническом комплексе установка ступени на платформу проведения диагностики и технического обслуживания;

– проведение диагностики, технического обслуживания, замены и ремонта систем и комплексов ступени;

– постановка ступени на хранение или выполнение работ по ее подготовке к повторному запуску.

В случае посадки на наземную площадку:

– стыковка агрегатов наземного комплекса обслуживания к ступени;

– продувка пневмогидросистемы;

– приведение посадочных опор, решётчатых рулей, системы реактивного управления в положения, необходимые для дальнейшей транспортировки;

– установка ступени на средство транспортировки;

– ремонтно-восстановительные работы на посадочной площадке (при необходимости);

– транспортировка ступени на технический комплекс;

– на техническом комплексе установка ступени на платформу проведения диагностики и технического обслуживания;

- проведение диагностики, технического обслуживания, замены и ремонта систем и комплексов ступени;

- постановка ступени на хранение или выполнение работ по ее подготовке к повторному запуску.

При подготовке РН к пуску с повторным использованием первой ступени [18; 19]:

- подготовка полезной нагрузки к запуску;

- автономная проверка функционирования посадочных опор, решётчатых рулей, системы реактивного управления, пневмо- и электроиспытания систем и агрегатов первой ступени;

- автономная подготовка второй ступени к запуску, пневмо- и электроиспытания систем и агрегатов ступени;

- монтаж переходного отсека, стыковка первой и второй ступеней, совместные пневмо- и электроиспытания систем и агрегатов РН;

- установка космической головной части на РН;

- монтаж головного обтекателя, проверка вновь образованных связей;

- транспортирование РН на стартовый комплекс;

- установка РН на стартовом комплексе в вертикальное положение;

- стыковка коммуникаций наземного оборудования к РН;

- проверка герметичности вновь образованных стыков;

- проведение испытаний и проверок на функционирование систем и агрегатов РН на стартовом столе;

- заправка РН криогенными компонентами ракетного топлива и сжатыми газами;

- пуск РН.

Результаты и их обсуждение

Для прогнозирования временных интервалов, требуемых для подготовки первой ступени РН Falcon 9 FT к повторному пуску, предлагается следующая методика.

Примем следующую гипотезу: количество повреждений возвращаемой ступени РН, подлежащих восстановлению для последующего пуска, описывается следующим выражением:

$$\Pi = K + \alpha n + \Theta, \quad (1)$$

где K – количество повреждений (неисправностей) узлов и агрегатов первой ступени РН, требующих восстановления для повторного пуска; α – статистический коэффициент возникновения повреждений (неисправностей); n – число повторных пусков первой ступени РН; Θ – количество случайных (нехарактерных) повреждений (неисправностей).

Время подготовки к следующему пуску предлагается определять с помощью следующего выражения:

$$t = \beta \Pi + \tau, \quad (2)$$

где β – коэффициент пропорциональности между количеством исправляемых повреждений (неисправностей) и временем, требуемым для их устранения; τ – время, требуемое для выполнения операций, не связанных с устранением повреждений (неисправностей) ступени,

возникших в результате предыдущего пуска (транспортировка РН в технологическую зону, проведение диагностики, сборка РН, транспортировка к месту старта, заправка РН и др.).

Примем, что t – случайная величина, которая согласно закону больших чисел подчиняется нормальному закону распределения.

Тогда плотность вероятности события (повторного пуска РН), которое произойдет через время t , может быть определено с помощью следующего выражения [15; 16]:

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

где μ – эмпирическое среднее (среднее время между повторными пусками); σ – среднее квадратическое отклонение от среднего времени между повторными пусками возвращаемой ступени РН.

Так как в статистике для данной выборки (время между пусками, см. табл. 2) величины μ и σ неизвестны, воспользуемся t -распределением Стьюдента [20].

Пусть $t_1, \dots, t_n$ – независимые случайные величины, где $t_i \in N(t, \mu, \sigma)$ – для всех i ; n – число повторных пусков.

Совокупность ($t_1, \dots, t_n$) можно понимать как выборку объемом n из генеральной совокупности, в котором признак t распределен по нормальному закону $N(t, \mu, \sigma)$.

Рассмотрим функцию распределения данной выборки с помощью следующего выражения [20]:

$$X^2 = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n (t_i - \mu)^2, \quad (4)$$

где X^2 – распределение с n -степенями свободы; n – число повторных пусков.

Распределение $T=X/Y$ с независимыми величинами X и Y , где X – нормальное распределение с законом $N(X, 0, 1)$, а $Y=X/\sqrt{n}$ (с n – степенями свободы), называется t -распределением Стьюдента и имеет плотность вероятности повторного запуска возвращаемой ступени, осуществленного через время t , которая может быть определена с помощью следующего выражения [7]:

$$\varphi(t) = \frac{\Gamma\left(n + \frac{1}{2}\right)}{\sqrt{\pi n} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \left(1 + \frac{t^2}{n}\right)^{-\frac{n+1}{2}}, \quad (5)$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция Эйлера, а величины X^2 и t являются табличными значениями (табулированные величины) [20].

Рассмотрим выборку из 30 повторных пусков (см. табл. 2). Для получения более точных результатов применения предлагаемой методики исключим из выборки интервалы времени между 3-м и 4-м пуском ступени В 1046, а также между 2-м и 3-м пуском ступени В 1047.

Определим эмпирическое среднее (среднее время между всеми пусками соответствующих ступеней) с помощью следующего выражения:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i. \quad (6)$$

В результате расчетов величина μ равна 102 суткам.

Далее с помощью выражения (4) определим эмпирическую дисперсию для $n-1$ степени свободы [20]:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \mu)^2. \quad (7)$$

Так как коэффициент Стьюдента для объема выборки $n=30$ $t_s=2$ (табличное значение), а величина

$$\sigma = \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (8)$$

среднее ожидаемое время между всеми повторными пусками соответствующих ступеней с вероятностью 95% будет находиться во временном интервале, который может быть рассчитан с помощью следующего выражения:

$$t = \mu \pm \Delta\mu, \quad (9)$$

где $\Delta\mu = t_s \frac{S}{\sqrt{n}} = 18$.

Поэтому значение ожидаемого временного интервала между повторными пусками при данной выборке составит величину t , равную 102 ± 18 суток.

Вместе с тем анализ диаграмм, представленных на рисунках 2 и 3, показывает, что за период 2019 – 2021 гг. компания SpaceX в среднем в четыре раза,

по сравнению с 2018 г., сократило среднее время подготовки первой ступени РН к повторному пуску.

Данное обстоятельство обусловлено следующими факторами:

- существенным наращиванием производственных мощностей компании SpaceX по производству составных частей и компонентов РН, необходимых для замены отработавших узлов и агрегатов возвращаемых ступеней;

- повышением надежности возвращаемых ступеней РН и, как следствие, минимизацией объема проводимых на них ремонтно-восстановительных работ;

- внедрением новейших технологий в регламентные работы по подготовке возвращенных ступеней к повторному запуску.

В связи с этим рассчитанную оценку времени подготовки первой ступени к повторному пуску по указанной выборке применительно к современным условиям следует считать завышенной.

Если же указанную методику применить к выборке интервалов времени подготовки к повторному пуску ступеней B1056, B1058, B1059, B1060 в период с 2019 по 2021 гг., то в результате вычислений будут получены следующие значения: $t = 55 \pm 10$ суток, т. е. $t \in (45; 65)$ суток, что подтверждается анализом представленных статистических данных (табл. 3, рис. 5).

Таблица 3. Среднее время, затраченное на подготовку к повторным пускам первых ступеней PH Falcon 9 FT (блок 5)

Table 3. Average time spent preparing for re-launches of the first stages of the Falcon 9 FT carrier rocket (block 5)

Номер ступени	2019			2020			2021		
	количество суток, затраченное на подготовку к повторному пуску ступени	количество повторных пусков	среднее время, затраченное на подготовку к повторному пуску, сутки	количество суток, затраченное на подготовку к повторному пуску ступени	количество повторных пусков	среднее время, затраченное на подготовку к повторному пуску, сутки	количество суток, затраченное на подготовку к повторному пуску ступени	количество повторных пусков	среднее время, затраченное на подготовку к повторному пуску, сутки
В 1046	365	0	365	411	1	411	0	0	0
В 1047	263	1	263	0	0	0	0	0	0
В 1048	399	2	200	128	1	128	0	0	0
В 1049	256	2	128	551	4	138	98	1	98
В 1051	102	1	102	549	5	110	89	2	45
В 1056	227	2	114	62	1	62	0	0	0
В 1058	0	0	0	158	3	53	94	3	47
В 1059	0	0	0	379	4	95	59	1	59
В 1060	0	0	0	115	2	58	102	2	51
Общее количество суток в году, затраченное на подготовку всех ступеней к повторному пуску	1612			2353			442		
Количество пусков		8			21			9	
Среднее время, затраченное на подготовку к одному повторному пуску, сутки	202			112			49		

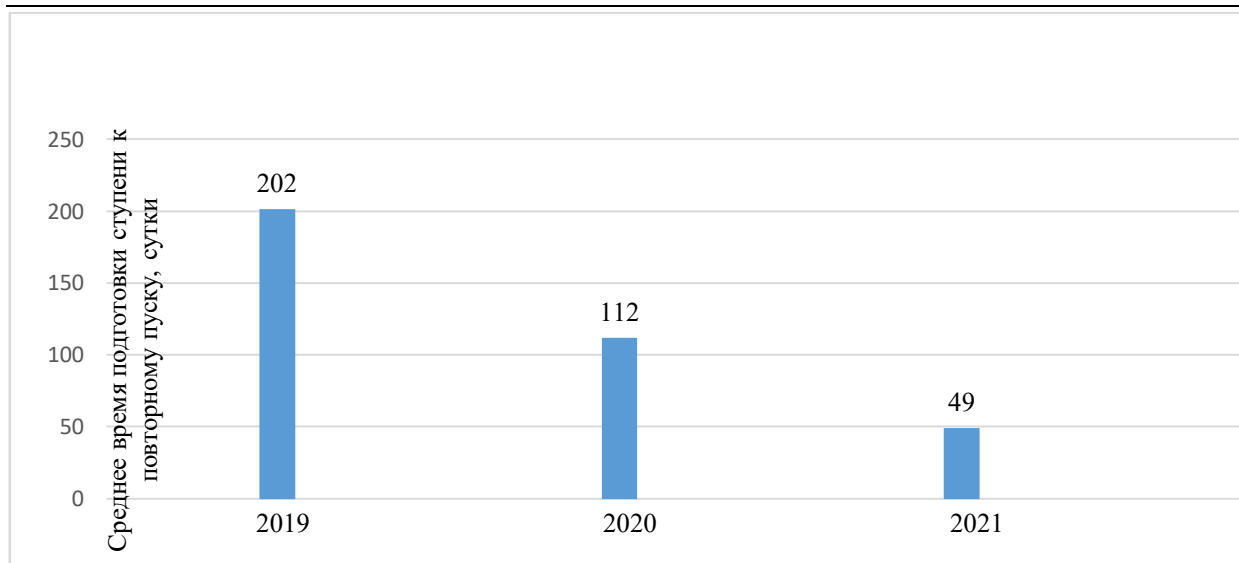


Рис. 5. Динамика изменения среднего времени подготовки первой ступени РН Falcon 9 FT (блок 5) к повторному пуску (по годам)

Fig. 5. Dynamics of changes in the average preparation time of the first stage of the Falcon 9 FT carrier rocket (block 5) for re-launch (by years)

Выводы

Представленная методика позволяет оценивать среднее время, необходимое для подготовки возвращаемых ступеней РН к последующим пускам, а следовательно, спрогнозировать возможности участников космической деятельности, имеющих в своем распоряжении много-разовые космические системы, по наращиванию их орбитальных группировок. Произведена валидация результатов расчетов времени подготовки возвращаемой ступени к повторному пуску,

выполненных с помощью разработанной методики с имеющимися статистическими данными. Расхождение результатов расчетов с реальными данными находится в пределах статистической погрешности. Следовательно, данная методика может быть использована при разработке алгоритмов, моделей, методов оценки времени подготовки возвращаемых ступеней к повторным пускам РН, а также при проведении оценки эффективности применения многоразовых (частично спасаемых) РН различных классов по назначению.

Список литературы

1. Ганиев Т. А., Карякин В. В. Космическая политика мировых и региональных держав: монография. М.: Архонт, 2020. 175 с.
2. Карбовская В. В. Перспективы развития международного космического рынка средств выведения тяжелого класса // Циолковский. Проблемы и будущее российской

науки и техники: материалы ЛП научных чтений памяти К. Э. Циолковского. Калуга: Эйдос, 2017. С. 477-478.

3. Медведев А. А. Предложения по повышению конкурентноспособности ракет-носителей среднего и тяжелого классов за счет применения многоразовых элементов в отечественных средствах выведения // Космонавтика и ракетостроение. 2018. № 3 (102). С. 111-121.

4. Эффективность использования и проблемы спасения первых ступеней ракет-носителей / А. С. Коротеев, В. М. Нестеров, И. О. Елисеев, А. В. Балашова // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2018. № 2. С. 3-11.

5. Горевич Б. Н. Анализ новых направлений развития ПРО США в свете принятой американской стратегии ПРО // Вестник воздушно-космической обороны. 2019. № 2 (22). С. 117-126.

6. SpaceX. URL: <http://spacex.com> (дата обращения: 25.05.2021).

7. Blue Origin. URL: <http://blueorigin.com> (дата обращения: 25.05.2021).

8. Rocket Lab. URL: <http://rocketlabusa.com> (дата обращения: 25.05.2021).

9. Компания «Space-X» и программа коммерческих пилотируемых полётов США / В. П. Краснослободцев, Ю. Н. Кузьмин, А. В. Раскин, И. В. Тарасов, В. А. Байкин // Двойные технологии. 2020. № 3 (92). С. 16-19.

10. Оценка энергетических потерь ракеты-носителя типа «фолкон» при различных вариантах реализации ракетодинамической системы спасения первой ступени / И. И. Кузнецов, Ю. Л. Кузнецов, М. Ж. Мухамеджанов, Д. С. Украинцев, Г. В. Шохов // Космонавтика и ракетостроение. 2016. № 3 (88). С. 83-92.

11. Пат. 2340864 С2 Российская Федерация. Способ управления полётом многоступенчатой ракеты-носителя и многоступенчатая ракета носитель / Данилкин В. А., Могиленко В. И., Панов Ю. П. № 2006135022/02; заявл. 03.10.06; опубл. 10.12.08.

12. List of Falcon 9 and Falcon Heavy launches. URL: <http://nasa.fandom.com> (дата обращения: 25.05.2021).

13. Рахман Р. М., Богатова О. А., Королев Д. А. Сравнение эффективности ракетопосителей // Новая наука: Теоретический и практический взгляд. 2016. № 6-2 (87). С. 122-126.

14. Савельева М. В., Горидько Н. П. Россия на мировом рынке космических пусковых услуг: конкурентноспособность и экономическая безопасность // Друкеровский вестник. 2018. № 3 (23). С. 163-175.

15. Селиверстов А. И., Шевченко И. В. Методические подходы к созданию динамической модели ракеты-носителя тяжелого класса // Технология машиностроения. 2014. № 4. С. 44-47.

16. Тяпкин С. А., Мухин И. Е., Коптев Д. С. Метод совместного применения показателя структуры вибросигнала и известных результатов идентификационных измерений в задачах превентивного обнаружения неисправностей авиационных двигателей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 2. С. 57-67.
17. К обоснованию выбора способа спасения блоков ракет носителей / А. С. Кретов, В. Н. Чижухин, М. М. Ковалевский, Ю. Г. Мехоношин // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2021. № 1. С. 3-11.
18. Кузнецов Ю. Л., Украинцев Д. С. Анализ влияния схемы полёта ступени с ракетно-динамической системой спасения на энергетические характеристики двухступенчатой ракеты-носителя среднего класса // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, № 1. С. 73-80.
19. Пирогов С. Ю., Прокопенко Е. А. Методика энергомассового анализа двухступенчатой ракеты-носителя, оборудованной системой спасения ступеней // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2018. № 665. С. 231-236.
20. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: КНОРУС, 2010. 664 с.

References

1. Ganiev T. A., Karyakin V. V. Kosmicheskaya politika mirovykh i regional'nykh derzhav [Space policy of world and regional powers]. Moscow, Archon Publ., 2020. 175 p.
2. Karbovskaya V. V. [Prospects for the development of the international space market of heavy class launch vehicles]. Tsiolkovskii. Problemy i budushchee rossiiskoi nauki i tekhniki. Materialy LII nauchnykh chtenii pamyati K. E. Tsiolkovskogo [Tsiolkovsky. Problems and the future of Russian science and technology. Materials of the LII scientific readings in memory of K. E. Tsiolkovsky]. Kaluga, Eidos Publ., 2017, pp. 477-478. (In Russ.)
3. Medvedev A. A. Predlozheniya po povysheniyu konkurentnosposobnosti raket-nositelei srednego i tyazhelogo klassov za schet primeneniya mnogorazovykh elementov v otechestvennykh sredstvakh vyvedeniya [Proposals to increase the competitiveness of medium- and heavy-class launch vehicles through the use of reusable elements in domestic launch vehicles]. *Kosmonavtika i raketostroenie = Cosmonautics and Rocket Science*, 2018, no. 3 (102), pp. 111-121.
4. Koroteev A. S., Nesterov V. M., Eliseev I. O., Balashova A. V. Effektivnost' ispol'zovaniya i problemy spaseniya pervykh stupenei raket nositelei [Efficiency of use and problems of rescue of the first stages of launch vehicles]. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-*

tekhnicheskii zhurnal = Flight. All-Russian Scientific and Technical Journal, 2018, no. 2, pp. 3-11.

5. Gorevich B. N. Analiz novykh napravlenii razvitiya PRO SShA v svete prinyatoi amerikanskoi strategii PRO [Analysis of new directions in the development of US missile defense in the light of the adopted American missile defense strategy]. *Vestnik vozdushno-kosmicheskoi oborony = Bulletin of Aerospace Defense*, 2019, no. 2 (22), pp. 117-126.

6. SpaceX. Available at: <http://spacex.com>. (accessed 25.05.2021)

7. Blue Origin. Available at: <http://blueorigin.com>. (accessed 25.05.2021)

8. Rocket Lab. Available at: <http://rocketlabusa.com>. (accessed 25.05.2021)

9. Krasnoslobodtsev V. P., Kuzmin Yu. N., Raskin A. V., Tarasov I. V., Baykin V. A. Kompaniya "Space-X" i programma kommercheskikh pilotiruemykh poletov SShA [Space-X Company and the US Commercial Manned Flight Progra]. *Dvoinye tekhnologii = Dual Technologies*, 2020, no. 3 (92), pp. 16-19.

10. Kuznetsov I. I., Kuznetsov Yu. L., Mukhamedzhanov M. Zh., Ukraintsev D. S., Shokhov G. V. Otsenka energeticheskikh poter' rakety-nositelya tipa "folkon" pri razlichnykh variantakh realizatsii raketodinamicheskoi sistemy spaseniya pervoi stupeni [Estimation of energy losses of a Falcon-type launch vehicle in various variants of the implementation of the rocket-dynamic rescue system of the first stage]. *Kosmonavtika i raketostroenie = Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2016, no. 3 (88), pp. 83-92.

11. Danilkin V. A., Mogilenko V. I., Panov Yu. P. Sposob upravleniya poletom mnogostupenchatoi rakety-nositelya i mnogostupenchataya raketa nositel' [The method of flight control of a multi-stage launch vehicle and a multi-stage launch vehicle]. Patent RF, no. 2006135022/02, 2008.

12. List of Falcon 9 and Falcon Heavy launches. Available at: <http://nasa.fandom.com>. (accessed 25.05.2021)

13. Rahman R. M., Bogatova O. A., Korolev D. A. Sravnenie effektivnosti raketonositelei [Comparison of the effectiveness of launch vehicles]. *Novaya nauka: Teoreticheskii i prakticheskii vzglyad. = New Science: Theoretical and Practical View*, 2016, no. 6-2 (87), pp. 122-126.

14. Savelyeva M. V., Goridko N. P. Rossiya na mirovom rynke kosmicheskikh puskovykh uslug: konkurentnosposobnost' i ekonomicheskaya bezopasnost' [Russia on the world market of space launch services: competitiveness and economic security]. *Drukerovskii vestnik = Drukerovsky Bulletin*, 2018, no. 3 (23), pp. 163-175.

15. Seliverstov A. I., Shevchenko I. V. Metodicheskie podkhody k sozdaniyu dinamicheskoi modeli rakety-nositelya tyazhelogo klassa [Methodological approaches to the

creation of a dynamic model of a heavy-class launch vehicle]. *Tekhnologiya mashinostroeniya = Technology of Machine-Building*, 2014, no. 4, pp. 44-47.

16. Tyapkin S. A., Mukhin I. E., Koptev D. S. Metod sovmestnogo primeneniya pokazatelya struktury vibrosignala i izvestnykh rezul'tatov identifikatsionnykh izmerenii v zadachakh preventivnogo obnaruzheniya neispravnostei aviatsionnykh dvigatelei [Method of joint application of the vibration signal structure indicator and known results of identification measurements in the tasks of preventive detection of aircraft engine malfunctions]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 57-67.

17. Kretov A. S., Chizhukhin V. N., Kovalevsky M. M., Mekhonoshin Yu. G. K obosnovaniyu vybora sposoba spaseniya blokov raket nositelei [To substantiate the choice of the method of rescue of carrier rocket blocks]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika = Proceedings of Higher Educational Institutions. Aviation Equipment*, 2021, no. 1, pp. 3-11.

18. Kuznetsov Yu. L., Ukraintsev D. S. Analiz vliyaniya skhemy poleta stupeni s raketno-dinamicheskoi sistemoi spaseniya na energeticheskie kharakteristiki dvukhstupenchatoi rakety-nositelya srednego klassa [Analysis of the effect of the flight scheme of a stage with a rocket-dynamic rescue system on the energy characteristics of a two-stage medium-class launch vehicle]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S. P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta = Bulletin of Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolev (National Research University)*, 2016, vol. 15, no. 1, pp. 73-80.

19. Pirogov S. Yu., Prokopenko E. A. Metodika energomassovogo analiza dvukhstupenchatoi rakety-nositelya, oborudovannoi sistemoi spaseniya stupenei [Methodology of energy-mass analysis of a two-stage launch vehicle equipped with a stage rescue system]. *Trudy Voenno-kosmicheskoi akademii imeni A. F. Mozhaiskogo = Proceedings of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky*, 2018, no. 665, pp. 231-236.

20. Wentzel E. S. Teoriya veroyatnostei [Probability Theory]. Moscow, KNORUS Publ., 2010. 664 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Стедьмах Станислав Феликсович, кандидат военных наук, старший научный сотрудник 173 лаборатории ВИ (НИ), Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: ssf-1964@mail.ru

Stanislav F. Stelmakh, Cand. of Sci. (Military), Senior Researcher at the 173 Laboratory of VI (NI), Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: ssf-1964@mail.ru

Андронов Владимир Германович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор, заведующий кафедрой космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vladia58@mail.ru

Vladimir G. Andronov, Dr. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Professor, Head of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vladia58@mail.ru

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

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

УДК 629.5.067.8

Нечеткие математические модели прогнозирования и оценки степени тяжести отравления угарным газом

М. В. Шевцов¹, Л. В. Стародубцева², Р. И. Сафронов³ ✉, С. С. Сергеева²

¹ Академия Государственной противопожарной службы МЧС России
ул. Галушкина 4, г. Москва 129366, Российская Федерация

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

³ Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова
ул. К. Маркса 70, г. Курск 305021, Российская Федерация

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Резюме

Целью исследования является повышение качества классификации степени тяжести отравления угарным газом за счет использования гибридных нечетких решающих правил.

Методы. В ходе приведенных исследований было показано, что современные подходы к классификации степени тяжести отравления угарным газом основываются на оценке концентрации окиси углерода в воздухе рабочей зоны или карбоксигемоглобина в крови, причем между исследуемыми классами состояний имеется значительная зона неопределенности, что снижает качество принимаемых решений и затрудняет выбор адекватных схем лечения.

Для снижения зоны неопределенности в работе предлагается увеличить число классов степени тяжести и для адекватного описания зон неопределенности использовать методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП) с ориентацией на модели оценки состояния здоровья, изменяющегося под влиянием воздействия вредных химических веществ.

Результаты. С использованием МСГНРП в работе синтезированы решающие правила, обеспечивающие надежное разделение пяти классов степени тяжести отравления угарным газом: норма, легкая, средняя, тяжелая и критическая степени отравления с уверенностью принимаемых решений не хуже 0,95, что позволяет достаточно точно оценивать состояние здоровья пациентов с назначением адекватных схем профилактики и лечения.

Заключение. В работе с использованием МСГНРП получены нечеткие модели классификации степени тяжести отравления угарным газом с выделением классов: норма, легкое, среднее, тяжелое и критическое отравление. В ходе экспертного оценивания и математического моделирования было показано, что диагностическая чувствительность, специфичность и уверенность в принимаемых решениях превышает величину 0,95, что в практической медицине считается хорошим результатом для исследуемого типа задач.

Ключевые слова: угарный газ; нечеткие математические модели; отравление; степень тяжести.

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

© Шевцов М. В., Стародубцева Л. В., Сафронов Р. И., Сергеева С. С., 2021

Для цитирования: Нечеткие математические модели прогнозирования и оценки степени тяжести отравления угарным газом / М. В. Шевцов, Л. В. Стародубцева, Р. И. Сафронов, С. С. Сергеева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 3. С. 180–198.

Поступила в редакцию 18.07.2021

Подписана в печать 11.08.2021

Опубликована 30.09.2021

Fuzzy Mathematical Models for Predicting and Assessing the Severity of Carbon Monoxide Poisoning

Maxim V. Shevtsov¹, Lilia V. Starodubtseva², Ruslan I. Safronov³ ✉, Snezhana S. Sergeeva²

¹ Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia
4 Galushkina str., Moscow 129366, Russian Federation

² Southwest State University,
50 let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

³ Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov
70 K. Marx str., Kursk 305021, Russian Federation

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Abstract

The purpose of the research is to improve the quality of classification of the severity of carbon monoxide poisoning through the use of hybrid fuzzy decision rules.

Methods. In the course of these studies, it was shown that modern approaches to classifying the severity of carbon monoxide poisoning are based on assessing the concentration of carbon monoxide in the air of the working area or carboxyhemoglobin in the blood, and there is a significant uncertainty zone between the studied classes of conditions, which reduces the quality of decisions made and makes it difficult to choose adequate treatment regimens. In order to reduce the uncertainty zone, it is proposed to increase the number of severity classes and to adequately describe the uncertainty zones, use the methodology for the synthesis of hybrid fuzzy decision rules with a focus on models for assessing the health status of a person changing under the influence of exposure to harmful chemicals.

Results. Using the methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules, we have obtained fuzzy mathematical models for the allocation of such classes of severity as normal, mild, medium, severe and critical degrees of poisoning with the confidence of decisions made no worse than 0.95, which allows us to accurately assess the health status of patients with the appointment of adequate prevention and treatment regimens.

Conclusion. In this paper, using the methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules, fuzzy models of classification of the severity of carbon monoxide poisoning with the allocation of classes: normal, mild, medium, severe and critical poisoning are obtained. During the expert evaluation and mathematical modeling, it was shown that the diagnostic sensitivity, specificity and confidence in the decisions made exceeds the value of 0.95, which is a good practical result for this class of problems.

Keywords: carbon monoxide; fuzzy mathematical models; poisoning; severity.

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

For citation: Shevtsov M. V., Starodubtseva L. V., Safronov R. I., Sergeeva S. S. Fuzzy Mathematical Models for Predicting and Assessing the Severity of Carbon Monoxide Poisoning. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2021; 11(3): 180–198. (In Russ.)

Received 20.07.2021

Accepted 11.08.2021

Published 30.09.2021

Введение

Известно, что отравление окисью углерода (СО) относят к наиболее тяжелой форме химической патологии, широко распространенной как в России, так и за рубежом, часто приводя к летальным исходам. Отравление угарным газом зачастую приводит к различного рода осложнениям, значительно утяжеляющим течение болезни. Социальные последствия от отравления СО связывают с потерей трудоспособности и инвалидизацией пострадавших от интоксикации угарным газом.

Одним из способов снижения риска инвалидизации от отравления угарным газом является своевременная и точная оценка степени тяжести отравления.

Прогноз возможной степени тяжести от отравления СО важен при направлении людей к месту чрезвычайных ситуаций, в ходе развития которых возможно выделение угарного газа.

Анализ принятой в России системы классификации степеней тяжести при отравлении угарным газом показал, что обычно выделяют три класса: легкое, среднее и тяжелое в сочетании с крайне тяжелым отравлением [1; 2; 3; 4; 5], причем границы между классами определяются весьма условно по содержанию

карбоксигемоглобина (HbCO) в крови, что в полевых условиях (вне клиники) сделать практически невозможно. В клинических условиях между границами классов также существует достаточно широкая зона неопределенности. Например, правая граница класса средняя тяжесть определена уровнем 40% HbCO, а левая класса тяжелое отравление – на уровне 50% HbCO. Эта неопределенность значительно возрастает, если оценивается концентрация СО в воздухе рабочей зоны, что часто бывает в практических случаях, например при пожаре.

Опыт решения задач по прогнозированию и оценке состояния здоровья людей, подвергающихся воздействию вредных химических веществ в условиях нечетко определяемых границ между исследуемыми классами состояний с плохоформализуемой структурой данных, накопленный в Юго-Западном государственном университете, показал, что приемлемое для практики качество принимаемых решений обеспечивается при использовании методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП) [6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13], на основе которой в работе разрабатываются нечеткие математические модели прогнозирования и оценки степени тяжести отравления угарным газом.

Материалы и методы

В основу проводимых исследований была положена классификация и

наблюдаемая клиническая картина, описанная в работе [2] и представленная таблицей 1.

Таблица 1. Критерии оценки степени тяжести отравления монооксидом углерода

Table 1. Criteria for assessing the severity of carbon monoxide poisoning

Тяжесть отравления	Клиническая картина
Легкая степень (содержание НbСО в крови до 10-20%)	Токсическая энцефалопатия: беспокойство, головная боль, симптом «обруча», головокружение, тошнота, рвота, шум в ушах, мерцание в глазах. Миоз.
Средняя степень (содержание НbСО в крови до 30-40%)	Нарушение функции дыхания: затруднение дыхания, першение в горле, чувство нехватки воздуха, осиплость голоса, кашель с мокротой, содержащей копоть. Токсическая энцефалопатия: шаткость походки, нарушение координации движений, покраснение кожи лица, дрожь, чувство слабости и страх, делириозный синдром, зрительно-слуховые галлюцинации, агрессивные эмоции. Анизокория. Миоз чередуется с мидриазом. Нарушение функции дыхания: гиперсаливация, бронхорея, инспираторная одышка, в легких выслушиваются разнокалиберные хрипы. Нарушение функции сердечно-сосудистой системы: гипертонический синдром с выраженной тахикардией.
Тяжелое и крайне тяжелое отравление (содержание НbСО в крови до 50-70%)	Токсическая энцефалопатия: сонливость, сопор, кома, снижение болевой чувствительности, тонические судороги, гипертермия. Нарушение функции дыхания: брадипноэ. На Rn-грамме эмфизема с усилением легочного рисунка; мелкоочаговые затемнения прикорневой локализации; диффузные крупноочаговые затемнения, токсический отек легких. Нарушение функции сердечно-сосудистой системы: возможны внезапная смерть, первичный токсикогенный коллапс, экзотоксический шок. На ЭКГ нарушения ритма и проводимости, признаки гипоксии миокарда. Трофические расстройства кожи и подлежащих тканей. Нарушение функции почек

Примечание. При концентрации НbСО в крови 30-40% смертность составляет 4,5%; при 40-50% – 14,5%; при 60-70% – 28,6%; при 70-80% – 48,5%. В общем признаки и симптомы острого отравления угарным газом можно ожидать на уровнях НbСО от 3 до 24%. Более серьезные признаки отравления СО развиваются на средних уровнях 24,3%, а смертельный исход на уровне от 32,1% до 60 %. Воздействие СО, приводящее к уровню НbСО > 50%, как правило, заканчивается смертельным исходом.

Основываясь на классификации, приводимой в таблице 1, эксперты, обученные на применение МСГНРП в медицинской предметной области под руководством инженера по знаниям, осуществляют синтез искомых математических моделей.

В основе МСГНРП лежит набор методов синтеза гибридных нечетных математических моделей, каждая из которых ориентирована на определенные типы структуры данных [6; 7; 8; 9; 10; 11; 12]. Выбор адекватных структуре данных методов синтеза производится в ходе разведочного анализа при проведении взаимодействия естественного интеллекта специалистов исследуемой предметной области (профпатологи, специалисты по интоксикации) с инженером по знаниям, владеющим методологией искусственного интеллекта.

Применительно к решаемой в работе задачи по оценке степени воздействия СО на организм человека и классификации степени тяжести отравления в рамках МСГНРП предлагается три типа моделей, в которых используются следующие базовые элементы [10; 14; 15]: функции принадлежности $\mu_{\ell}(x_i)$ к исследуемым классам состояний $\omega_{\ell}(\ell = 1, \dots, L)$ с базовыми переменными (информативными признаками $x_i(i = 1, \dots, I)$; $f_{\ell}(Y_i)$ – нормирующие функции, приводящие разнородные показатели Y_i к единой нормированной шкале измерений; $Y_{\ell i}$ – частные уверенности в применяемых решениях по классу ω_{ℓ}

для переменной x_i ; $\alpha_{\ell i}(f)$ – поправочные коэффициенты, позволяющие учитывать время нахождения людей в зоне воздействия ядовитого вещества h_i (в исследуемом случае СО возможно в сочетании с другими вредными веществами); UF_{ℓ} – уверенность в ω_{ℓ} по набору информативных признаков.

Первый тип моделей основан на использовании показателя НbСО в крови пациента:

$$z_{\ell i} = f_{\ell i} \left(\frac{c_i}{c_{pi}} \right) \cdot f_{\ell i}^* \left(\frac{t_i}{t_{pi}} \right), \quad (1)$$

где c_{pi} – резистентная концентрация исследуемого, вредного для организма человека вещества h_i , (для СО резистентная концентрация может определяться по содержанию НbСО в крови); t_{pi} – резистентное время; $f_{\ell i}(\cdot)$ – нормировочная функция для резистентной концентрации с областью определения $[0, \dots, 1]$; $f_{\ell i}^*(\cdot)$ – нормировочная функция по времени с областью определения $[0, \dots, 1]$.

При невозможности определения резистентных концентраций, например в полевых условиях, используют предельно допустимую концентрацию в воздухе рабочей зоны, определяя базовую переменную по формуле

$$Z_{\ell i} = f_{\ell i} \left(\frac{c_i}{c_{\Pi i}} \right) \cdot f_{\ell i}^* \left(\frac{t_i}{t_{\Pi i}} \right). \quad (2)$$

Для выбранного типа базовых переменных определяются функции принад-

лежности $\mu_{\ell}^d(Z_{li})$, являющиеся частными решающими правилами для класса ω_{ℓ} по задаче d .

Задачи d выбираются из следующего их списка: $d = \text{ст}$ – степень тяжести; $d = \text{п}$ – прогноз; $d = \text{р}$ – ранняя стадия; $d = \text{д}$ – дифференциальный диагноз.

Уверенность в классификации ω_{ℓ} по группе вредных химических веществ h_i ; включая СО, определяется нечеткой функцией вида

$$UF_{\ell}^d = Ag_{\ell}^d[\mu_{\ell}^d(Z_{li})], \quad (3)$$

где Ag_{ℓ}^d – агрегатор функций принадлежности для класса ω_{ℓ} ; $i = 1, 2, \dots, I$; d – тип решаемой задачи.

Если в ходе исследований возникают проблемы с построением нормирующих функций, а в распоряжении экспертов информация, «связывающая» уровни концентрации и время воздействия с состоянием организма человека, например, так, как это представлено в таблице 1, то в качестве базовой переменной для функций принадлежности к классу ω_{ℓ} следует выбрать отношение c_i/c_{pi} или c_i/c_{pi} , а время воздействия учитывать с помощью поправочного коэффициента $\alpha_{\ell}(t)$.

Тогда частная уверенность в ω_{ℓ} по задаче d от воздействия вредного вещества h_i определяется выражением

$$U_{li}^d = \mu_{\ell}^d(Q_i) \cdot \alpha_{\ell}(t), \quad (4)$$

где $Q_i = c_i/c_{pi}$ или $Q_i = c_i/c_{pi}$.

Для множества вредных веществ уверенность в ω_{ℓ} определяется выражением

$$UF_{\ell}^d = Ag_{\ell}^d[U_{li}^d], \quad (5)$$

где Ag_{ℓ}^d – соответствующая функция агрегации.

Результаты и их обсуждение

Основываясь на данных литературных источников, мнение экспертов и собственный опыт, было принято решение на расширение списка степеней тяжести до пяти: отравление отсутствует (класс норма) – ω_H ; легкая степень – класс ω_L ; средняя тяжесть – класс ω_C ; тяжелая степень – класс ω_T ; крайне тяжелая степень отравления, приводящая к смерти, – класс ω_K .

В качестве базовых моделей классификации, исходя из доступного материала исследований, эксперты выбрали модели (4) и (5).

Предельно допустимая концентрация СО в воздухе рабочей зоны определяется на уровне 0,02 мг/л.

С учетом широкого динамического диапазона концентраций СО, порождающих различные степени отравления ($Q_{CO} = C_{CO}/C_{пCO}$ измеряется от 0 до 750), было принято решение синтезировать три группы функции принадлежности: $\mu_H(Q_{CO})$ и $\mu_L(Q_{CO})$ для диапазона Q_{CO} [0, ..., 30]; $\mu_C(Q_{CO})$ для диапазона Q_{CO} [10, ..., 60]; $\mu_T(Q_{CO})$ и $\mu_K(Q_{CO})$ для диапазона Q_{CO} выше 50.

Графики функций принадлежности и временных поправок отроились в соответствии с общими рекомендациями МСГНРП, приведенными в работах [6; 7; 13].

На рисунке 1 приведены графики функций принадлежности к классам ω_H и ω_L с соответствующими графиками временных поправок $\alpha_H(t)$ и $\alpha_L(t)$.

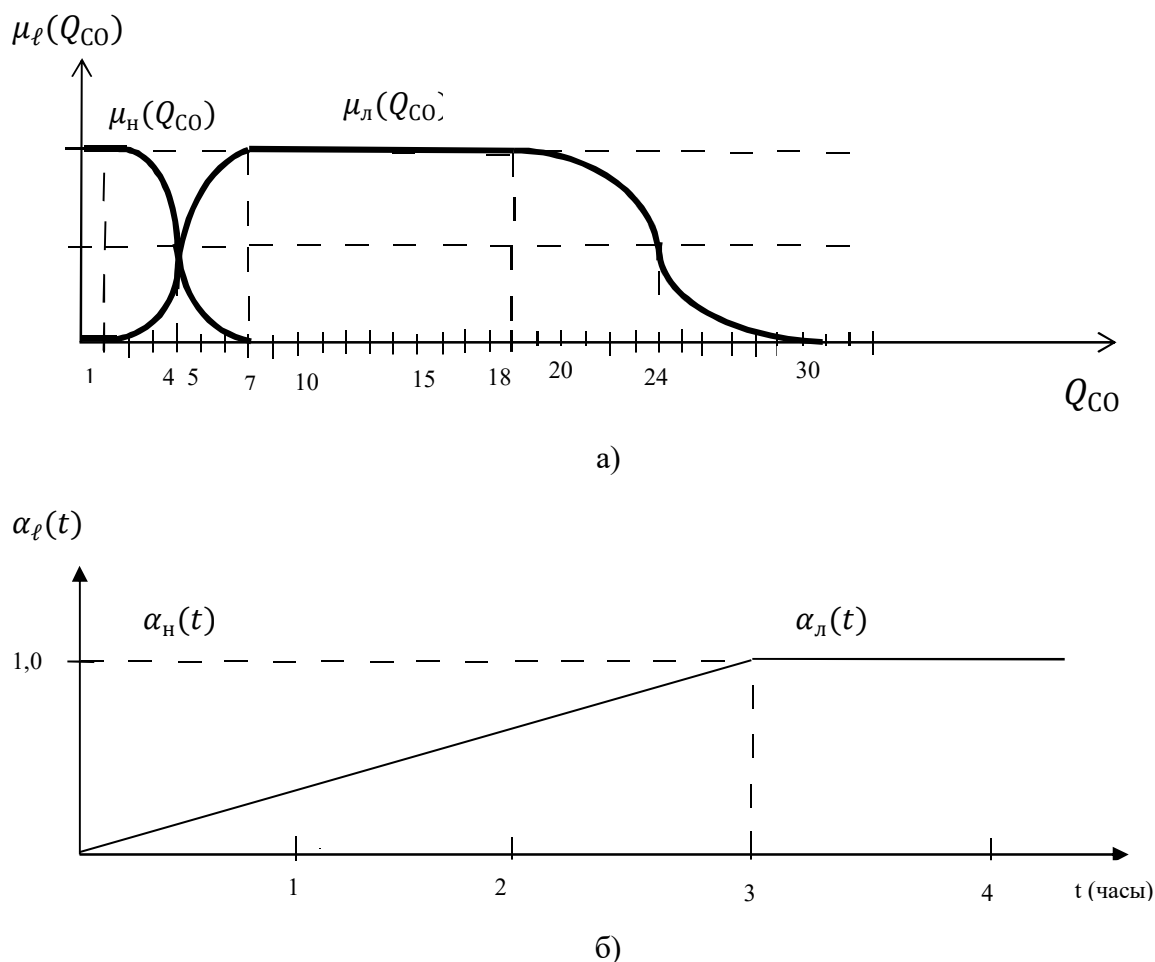


Рис. 1. Графики функций: а – принадлежности к ω_H и ω_L ; б – временных поправок к классам ω_H и ω_L

Fig. 1. Graphs functions of: а – of belonging to ω_H and ω_L ; б – temporary corrections to classes ω_H and ω_L

Аналитически графики, приведенные на рисунке 1, описываются выражениями:

$$\mu_H(Q_{CO}) = \begin{cases} 1,0, & \text{если } Q_{CO} < 1, \\ 1 - 0,056(Q_{CO} - 1)^2, & \text{если } 1 \leq Q_{CO} < 4, \\ 0,056(Q_{CO} - 7)^2, & \text{если } 4 \leq Q_{CO} < 7, \\ 0, & \text{если } Q_{CO} \geq 7; \end{cases}$$

$$\mu_L(Q_{CO}) = \begin{cases} 0, & \text{если } Q_{CO} < 1, \\ 0,056(Q_{CO} - 1)^2, & \text{если } 1 \leq Q_{CO} < 4, \\ 1 - 0,056(Q_{CO} - 7)^2, & \text{если } 4 \leq Q_{CO} < 7, \\ 1, & \text{если } 7 \leq Q_{CO} < 18, \\ 1 - 0,014(Q_{CO} - 18)^2, & \text{если } 18 \leq Q_{CO} < 24, \\ 0,014(Q_{CO} - 30)^2, & \text{если } 24 \leq Q_{CO} < 30, \\ 0, & \text{если } Q_{CO} \geq 30; \end{cases}$$

$$\alpha_H(t) = \begin{cases} -0,333 Q_{CO} + 1, & \text{если } Q_{CO} < 3, \\ 0, & \text{если } Q_{CO} \geq 3; \end{cases}$$

$$\alpha_L(t) = \begin{cases} 0,333 Q_{CO}, & \text{если } Q_{CO} < 3, \\ 1, & \text{если } Q_{CO} \geq 3. \end{cases}$$

С учетом модели (4) уверенность в наличии нормального состояния и легкой стадии отравления СО определяется выражениями:

$$U_H(CO) = \mu_H(Q_{CO}) \cdot \alpha_H(t), \quad (6)$$

$$U_L(CO) = \mu_L(Q_{CO}) \cdot \alpha_L(t). \quad (7)$$

На рисунке 2 приведены графики функции принадлежности и временной поправки для класса средняя тяжесть отравления.

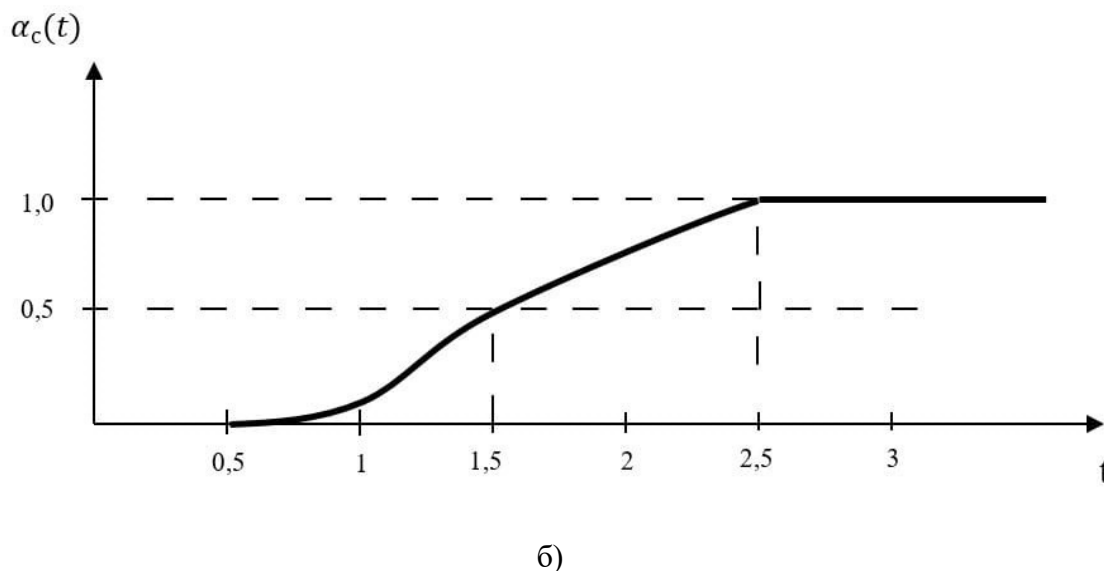
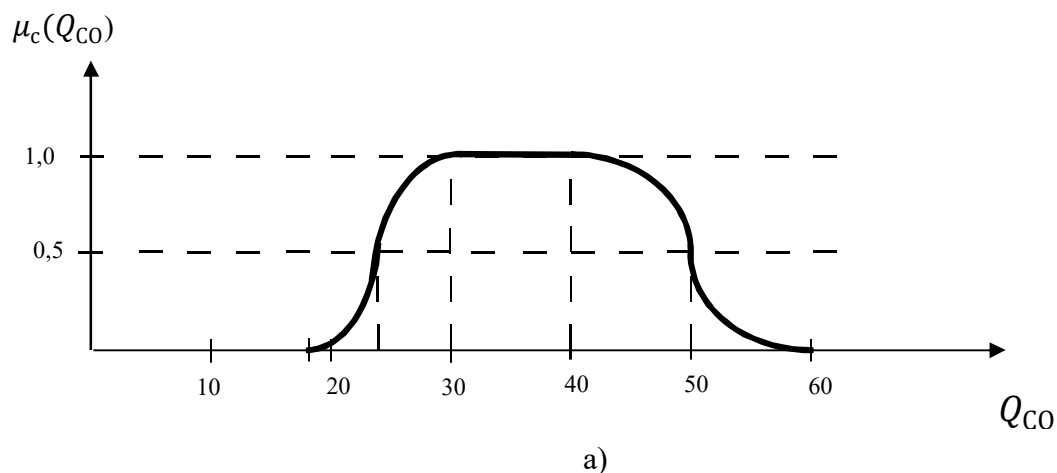


Рис. 2. Графики функции: а – принадлежности к ω_C ; б – временной поправки к ω_C

Fig. 2. Graphs functions: а – of belonging to ω_C ; б – time correction to ω_C

Аналитически графики функций принадлежности и временной поправки, приведенные на рисунке 2, описываются выражениями:

$$\mu_c(Q_{CO}) = \begin{cases} 0, & \text{если } Q_{CO} < 18, \\ 0,014(Q_{CO} - 18)^2, & \text{если } 18 \leq Q_{CO} \leq 24, \\ 1 - 0,014(Q_{CO} - 30)^2, & \text{если } 24 \leq Q_{CO} < 30, \\ 1, & \text{если } 30 \leq Q_{CO} \leq 40, \\ 1 - 0,005(Q_{CO} - 40)^2, & \text{если } 40 \leq Q_{CO} < 50, \\ 0,005(Q_{CO} - 60)^2, & \text{если } 50 \leq Q_{CO} < 60, \\ 0, & \text{если } Q_{CO} \geq 60; \end{cases}$$

$$\alpha_c(t) =$$

$$= \begin{cases} 1, 0, & \text{если } t < 0,5, \\ 0,5(t - 0,5)^2, & \text{если } 0,5 \leq t < 1,5, \\ 1 - 0,5(t - 2,5)^2, & \text{если } 1,5 \leq t < 2,5, \\ 1, & \text{если } t \geq 2,5. \end{cases}$$

В соответствии с (4)

$$U_c(CO) = \mu_c(Q_{CO}) \cdot \alpha_c(t) \quad (8)$$

На рисунке 3 приведены графики функций принадлежности для классов ω_T и ω_K .

С учетом короткого времени (несколько минут) наступления тяжелого и особенно критического состояния при высоких концентрациях СО временные поправки при оценке степени тяжести не учитываются.

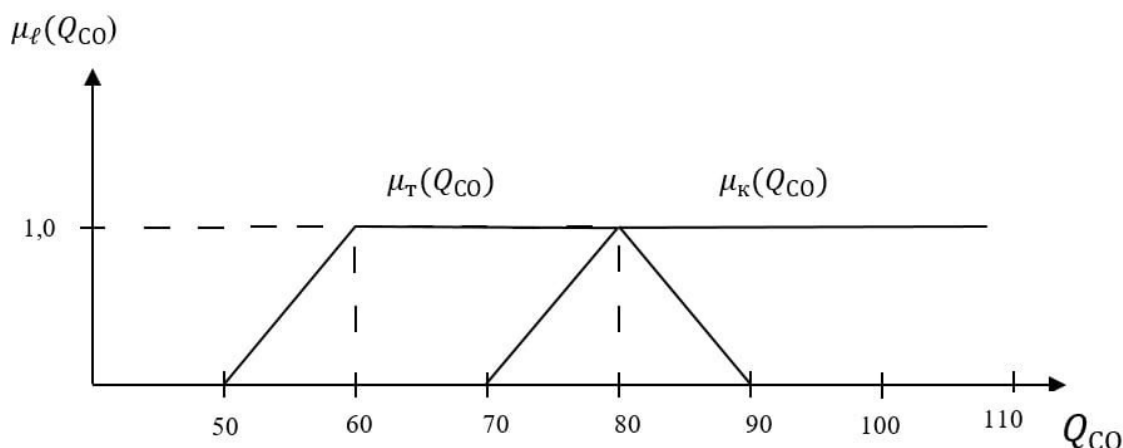


Рис. 3. Графики функций принадлежности к классам ω_T и ω_K

Fig. 3. Graphs of class membership functions ω_T and ω_K

Аналитически графики, приведенные на рисунке 3, описываются следующими выражениями:

$$\mu_T(Q_{CO}) = \begin{cases} 0, & \text{если } Q_{CO} < 50, \\ 0,1Q_{CO} - 5, & \text{если } 50 \leq Q_{CO} < 60, \\ 1, & \text{если } 60 \leq Q_{CO} < 80, \\ -0,1Q_{CO} + 9, & \text{если } 80 \leq Q_{CO} < 90, \\ 0, & \text{если } Q_{CO} \geq 90; \end{cases}$$

$$\mu_K(Q_{CO}) = \begin{cases} 0, & \text{если } Q_{CO} < 70, \\ 0,1Q_{CO} - 70, & \text{если } 70 \leq Q_{CO} < 80, \\ 1, & \text{если } Q_{CO} \geq 80. \end{cases}$$

Соответствующие уверенности определяются следующими выражениями:

$$U_T(CO) = \mu_T(Q_{CO}), \quad (9)$$

$$U_K(CO) = \mu_K(Q_{CO}). \quad (10)$$

Решение о классификации Ω_ℓ принимается по максимальному значению рассчитанных уверенностей $U_\ell(CO)$:

$$\Omega_\ell = \max \left[\begin{matrix} U_H(Q), U_L(Q), U_C(Q), \\ U_T(Q), U_K(Q) \end{matrix} \right]. \quad (11)$$

При равенстве двух уверенностей решение принимается в пользу более тяжелой степени отравления.

В силу специфики решаемой задачи для проверки качества полученного решающего правила в практически приемлемые сроки собрать репрезентативную контрольную выборку, особенно по классам ω_T и ω_K , не представляется возможным. Поэтому проверка качества работы модели (11) осуществлялась методами экспертного оценивания и математического моделирования.

Для экспертного оценивания привлекались семь высококвалифицированных специалистов-токсикологов, давших оценки диагностической чувствительности (ДЧ) и специфичности (ДС) по методу Делфи [8].

Результаты экспертных оценок приведены ниже (табл. 2).

Таблица 2. Экспертные оценки модели 11

Table 2. Expert assessments of the model 11

ω_ℓ	ω_H	ω_L	ω_C	ω_T	ω_K
ПК					
ДЧ	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99
ДС	0,97	0,97	0,98	0,98	0,97
<i>Примечание.</i> ПК – показатели качества					

Для оценки качества работы модели (11) с использованием методов математического моделирования использова-

лась уточненная клиническая симптоматика, описанная в работе [2] в виде таблицы 3.

Таблица 3. Токсические концентрации и симптомы при отравлении людей CO (Н. В. Лазарев, 1977)**Table 3.** Toxic concentrations and symptoms of poisoning of people with CO (N. V. Lazarev, 1977)

Концентрация, мг/л	Длительность воздействия	Содержание НbCO, %	Симптомы отравления
0,006	25 мин	-	Снижение цветовой и световой чувствительности глаз
0,031	3 ч	-	Снижение точности зрительного восприятия пространства и ночного зрения
>0,05-0,06	2 ч	-	Снижение слуха. Изменение ЭЭГ
	5 ч	-	Ухудшение выполнения психологических тестов
0,08-0,11	3,5-5 ч	7-10	Снижение скорости зрительного восприятия, ухудшение выполнения психологических и психомоторных тестов, координации мелких точных движений и аналитического мышления
0,22	2-3 ч	-	Легкая боль в области лба
0,23	6 ч	16-20	Боль в области лба, ощущение давления на лоб, быстро исчезающие на свежем воздухе; расширение кожных кровеносных сосудов; снижение физической работоспособности
0,23-0,34	5-6 ч	23-30	Головная боль. Ощущение пульсации в висках. Головокружение
0,34	4 ч	22-24	То же
0,44-0,46	5 ч	26-27	То же
	1 ч	15-19	Боли в области лба и затылка
	2 ч	21-28	То же
	2,5-3 ч	-	То же
0,46-0,69	4-5 ч	36-40	Сильная головная боль, слабость, головокружение, туман перед глазами, тошнота и рвота, коллапс
0,8-1,0	20-30 мин	-	Головная боль, общая мышечная слабость, тошнота; потери трудоспособности не было
0,88	45 мин	-	Головная боль, головокружение, тошнота
	2 ч	-	Потеря сознания; коллапс
0,8-1,15	3-4 ч	47-53	Сильная головная боль, слабость, головокружение, туман перед глазами, тошнота, рвота, учащение пульса, коллапс
1,35	33 мин-1,5 ч	-	Сердцебиение. Легкое пошатывание, одышка при легкой мышечной работе, расстройства зрения и слуха

Окончание табл. 3 / Table 3 (ending)

Концентрация, мг/л	Длительность воздействия	Содержание HbCO , %	Симптомы отравления
0,23-0,34	5-6 ч	23-30	Головная боль. Ощущение пульсации в висках. Головокружение
0,34	4 ч	22-24	То же
	5 ч	26-27	То же
0,44-0,46	1 ч	15-19	Боли в области лба и затылка
	2 ч	21-28	То же
	2,5-3 ч	-	То же
0,46-0,69	4-5 ч	36-40	Сильная головная боль, слабость, головокружение, туман перед глазами, тошнота и рвота, коллапс
0,8-1,0	20-30 мин	-	Головная боль, общая мышечная слабость, тошнота; потери трудоспособности не было
0,88	45 мин	-	Головная боль, головокружение, тошнота
	2 ч	-	Потеря сознания; коллапс
0,8-1,15	3-4 ч	47-53	Сильная головная боль, слабость, головокружение, туман перед глазами, тошнота, рвота, учащение пульса, коллапс
1,35	33 мин-1,5 ч	-	Сердцебиение. Легкое пошатывание, одышка при легкой мышечной работе, расстройства зрения и слуха
	2 ч	-	Пульсирующая головная боль, спутанность в мыслях
1,26-1,72	1,5-3 ч	55-60	Учащение дыхания и пульса; кома, судороги; дыхание Чейна-Стокса
1,76	20 мин	-	Головная боль, головокружение, тошнота
	2 ч	-	Потеря сознания, коллапс
1,8-2,3	1-1,5	61-64	То же. Ослабление дыхания и сердечной деятельности. Может наступить смерть
2,3-3,4	30-45 мин	64-68	То же
3,52	5-10 мин	-	Головная боль, головокружение
	30 мин	-	Рвота, потеря сознания
3,4-5,7	20-30 мин	68-73	Слабый пульс, замедление и остановка дыхания. Смерть
5,7-11,5	2-5 мин	73-76	То же
7,04	1-2 мин	-	Головная боль, головокружение
	10-15 мин	-	Потеря сознания, рвота
14,08	1-3 мин	-	Потеря сознания, рвота, смерть

В ходе моделирования данные о концентрации из таблицы 3 использовались для расчета $U_{\lambda}(CO)$ (модели 6,...,10), классификация по модели (11) сопоставлялась с симптоматикой таблицы 3 и классификацией таблицы 1. В ходе такого сопоставления было установлено, что уверенность в правильной классификации превышает уровень 0,95. В работах [9; 10; 11; 12; 15; 16; 17; 18; 19] было показано, что дальнейшее увеличение качества классификации может быть получено при использовании дополнительных признаков, более подробно описывающих экологическую обстановку и индивидуальные факторы риска, которые могут быть уточнены при ис-

пользовании энергетических характеристик биологически активных точек [10; 20; 21].

Выводы

В работе с использованием методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил получены нечеткие модели классификации степени тяжести отравления угарным газом с выделением классов: норма, легкое, среднее, тяжелое и критическое отравление. В ходе экспертного оценивания и математического моделирования было показано, что диагностическая чувствительность, специфичность и уверенность в принимаемых решениях превышает величину 0,95, что является хорошим практическим результатом для данного класса задач.

Список литературы

1. Куценко С. А. Основы токсикологии. СПб.: Фолиант, 2004. С. 550-551.
2. Отравление монооксидом углерода (угарным газом) / Ю. В. Зобнин, Т. Н. Савватеева-Любимова, А. Н. Коваленко, А. Ю. Петров, С. А. Васильев, Б. В. Батоцыренов, М. Г. Романцов / под ред. Ю. В. Зобнина. СПб.: Тактик-Студио, 2011. 80 с.
3. Остапенко Ю. Н. Отравление аварийно химически опасными веществами // Медицинская токсикология: национальное руководство / под ред. Е. А. Лужникова. М.: ГЭОТР-Медиа, 2012. С. 669–684.
4. Медицинская токсикология: национальное руководство / под ред. Е. А. Лужникова. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2012. 928 с.
5. Токсическое действие окиси углерода: Федеральные клинические рекомендации / под ред. Ю. Н. Остапенко. М., 2013. URL: <http://www.mzdrav.rk.gov.ru> (дата обращения: 04.06.2021).
6. Корневский Н. А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.

7. Корневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1 (289). С. 33-35.
8. Корневский Н. А., Разумова К. В. Синтез нечетких классификационных правил в многомерном пространстве признаков для медицинских приложений // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2-1. С. 223-227.
9. Корневский Н. А., Тутов Н. Д., Лазурина Л. П. Проектирование медико-экологических информационных систем / Курский государственный технический университет. Курск, 2001. 193 с.
10. Синтез нечетких решающих правил для прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, вызываемых состоянием окружающей среды, с учетом индивидуальных особенностей организма / Н. А. Корневский, Ю. А. Иванков, Е. А. Яковлева, Н. Н. Савченко // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2007. Т. 6, № 2. С. 395-400.
11. Корневский Н. А., Коптева Н. А., Крупчатников Р. А. Прогнозирование и ранняя диагностика заболеваний сельскохозяйственных рабочих на основе нечеткой логики принятия решений // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2008. Т. 4, № 7. С. 86-89.
12. Корневский Н. А., Башир А. С., Горбатенко С. А. Синтез гибридных нечетких правил для прогнозирования, оценки и управления состоянием здоровья в экологически неблагоприятных регионах // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013 № 4. С. 69-73.
13. Korenevskiy N. A Application of Fuzzy Logic for Decision-Making in MedicalExpert Systems // Biomedical Engineering. 2015. Vol. 49. P. 46-49.
14. Метод синтеза нечетных моделей и ранней диагностики профессиональных заболеваний работников гальванических производств / Н. А. Корневский, И. Ю. Григоров, Т. Н. Говорухина, Р. А. Крупчатников // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 3. С. 163-169.
15. Степашов Р. В. Метод, модели и алгоритм прогнозирования и ранней диагностики профессиональных заболеваний работников агропромышленного комплекса, контактирующих с ядохимикатами, на основе гибридных нечетких технологий: дис. ... канд. тех. наук. Курск, 2018. 144 с.
16. Лукашов М. И., Корневский Н. А., Еремин А. В. Определение уровня длительного физического утомления как фактора риска рецидивов хронических заболеваний // Биомедицинская радиоэлектроника. 2009. № 5. С. 10-15.

17. Метод оценки функционального резерва человека-оператора на основе комбинированных правил нечеткого вывода / Н. А. Корневский, А. Н. Коростелев, Л. В. Стародубцева, В. В. Серебровский // Биотехносфера. 2012. № 1 (19). С. 44-49.
18. Fuzzy definition of the psychoemotional level of a person / N. Korenevsky, Riad Taha Al-Kasasbeh, F. Ionescu, M. Alshamasin, Anrev P. Smith // Mega-conference on biomedical engineering: Materials of the 4th International Conference on the development of biomedical engineering. Ho Chi Minh City, 2012. P. 354-357.
19. Korenevskiy N. A., Al-Kasasbeh R. T., Ionescou F., Alshamasin M., Alkasasbeh E., Smith A. P. Fuzzy determination of the human's level of psycho-emotional // IFMBE Proceedings. 2013. Vol. 40. P. 213-216.
20. Al-Kasasbeh R., Alshamasin M., Korenevskiy N., Kuzmin A., Ionescou F. Synthesis of fuzzy logic for prediction and medical diagnostics by energy characteristics of Acupuncture Points // Journal of acupuncture and Meridian Studies. 2011. Vol. 4, no. 3. P. 175-182.
21. Буняев В. В., Корневский Н. А. Методы поиска информативных проекционных зон и синтеза нечетких решающих правил для рефлексодиагностики // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2004. Т. 3, № 3. С. 175-178.

References

1. Kutsenko S. A. Osnovy toksikologii [Fundamentals of toxicology]. St. Petersburg, IZDATEL Folio Publ., 2004, pp. 550-551.
2. Zobnin V., Savvateeva-Lyubimova T. N., Kovalenko A. N., Petrov A. Yu., Vasil'ev S. A., Batotsyrenov B. V. Romantsov M. G. Otravlenie monooksidom ugleroda (ugarnym gazom) [Poisoning with carbon monoxide (carbon monoxide)]; ed. by Yu. V. Zobnina. St. Petersburg, Tactics-Studio Publ., 2011. 80 p.
3. Ostapenko Yu. N. Otravlenie avariino khimicheskimi opasnymi veshchestvami [Poisoning with emergency chemically dangerous substances]. Meditsinskaya toksikologiya: natsional'noe rukovodstvo [Medical toxicology: National Guidelines]; ed. by E. A. Luzhnikov. Moscow, GEOTR-Media Publ., 2012, pp. 669-684.
4. Meditsinskaya toksikologiya: natsional'noe rukovodstvo [Medical toxicology: national guidelines]; ed. by E. A. Luzhnikova. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2012. 928 p.
5. Toksicheskoe deistvie okisi ugleroda Federal'nye klinicheskie rekomendatsii [Toxic effect of carbon monoxide: federal clinical recommendations]; ed. by Yu. N. Ostapenko. Moscow, 2013. Available at: <http://www.mzdrav.rk.gov.ru>. (accessed 04.06.2021)
6. Korenevsky N. A., Rodionova S. N., Khripina I. I. Metodologiya sinteza gibridnykh nechetkikh reshayushchikh pravil dlya meditsinskikh intellektual'nykh sistem podderzhki prinyatiya reshenii [Methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems]. Stary Oskol, TNT Publ., 2019. 472 p.

7. Korenevsky N. A. Ispol'zovanie nechetkoi logiki prinyatiya reshenii dlya meditsinskikh ekspertnykh sistem [The use of fuzzy decision-making logic for medical expert systems]. *Meditsinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2015, no. 1 (289), pp. 33-35.

8. Korenevsky N. A., Razumova K. V. Sintez nechetkikh klassifikatsionnykh pravil v mnogomernom prostranstve priznakov dlya meditsinskikh prilozhenii [Synthesis of fuzzy classification rules in a multidimensional feature space for medical applications]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation*, 2012, no. 2-1, pp. 223-227.

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

10. Korenevsky N. A., Ivankov Yu. A., Yakovleva E. A., Savchenko N. N. Sintez nechetkikh reshayushchikh pravil dlya prognozirovaniya i rannei diagnostiki zabolevaniy, vyzyvaemykh sostoyaniem okruzhayushchei sredy, s uchetom individual'nykh osobennostei organizma [Synthesis of fuzzy decision rules for predicting and early diagnosis of diseases caused by the state of the environment, taking into account the individual characteristics of the body]. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2007, vol. 6, no. 2. pp. 395-400.

11. Korenevsky N. A., Kopteva N. A., Krupchatnikov R. A. Prognozirovanie i rannaya diagnostika zabolevaniy sel'skokhozyaistvennykh rabochikh na osnove nechetkoi logiki prinyatiya reshenii [Forecasting and early diagnosis of diseases of agricultural workers on the basis of fuzzy logic of decision-making]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2008, vol. 4, no. 7, pp. 86-89.

12. Korenevsky N. A., Bashir A. S., Gorbatenko S. A. Sintez gibridnykh nechetkikh pravil dlya prognozirovaniya, otsenki i upravleniya sostoyaniem zdorov'ya v eko-logicheski neblagopriyatnykh regionakh [Synthesis of hybrid fuzzy rules for forecasting, assessment and management of health status in environmentally unfavorable regions]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation*, 2013, no. 4, pp. 69-73.

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

14. Korenevsky N. A., Grigorov I. Yu., Govorukhina T. N., Krupchatnikov R. A. Metod sinteza nechetnykh modelei i rannei diagnostiki professional'nykh zabolevaniy rabotnikov gal'vanicheskikh proizvodstv [Method of synthesis of odd models and early diagnosis of occupational diseases of electroplating production workers]. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2019, vol. 18, no. 3, pp. 163-169.

15. Stepashov R. V. Metod, modeli i algoritm prognozirovaniya i rannei diagnostiki professional'nykh zabolevaniy rabotnikov agropromyshlennogo kompleksa, kontaktiruyushchikh s yadokhimikatami, na osnove gibridnykh nechetkikh tekhnologii. Diss. kand. tekhn. nauk [Method, models and algorithm for forecasting and early diagnosis of occupational diseases of agricultural workers in contact with pesticides, based on hybrid fuzzy technologies. Cand. techn. sci. diss.]. Kursk, 2018. 144 p.

16. Lukashov M. I., Korenevsky N. A., Eremin A. V. Opredelenie urovnya dlitel'nogo fizicheskogo utomleniya kak faktora riska retsidivov khronicheskikh zabolevaniy [Determination of the level of prolonged physical fatigue as a risk factor for relapses of chronic diseases]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2009, no. 5, pp. 10-15.

17. Korenevsky N. A., Korostelev A. N., Starodubtseva L. V., Serebrovsky V. V. Metod otsenki funktsional'nogo rezerva cheloveka-operatora na osnove kombinirovannykh pravil nechetskogo vyvoda [Method of assessing the functional reserve of a human operator based on combined rules of fuzzy inference]. *Biotekhnosfera = Biotechnosphere*, 2012, no. 1 (19), pp. 44-49.

18. Korenevsky N., Al-Kasasbeh Riad Taha, Ionescu F., Alshamasin M., Smith Anrev P. Fuzzy definition of the psychoemotional level of a person. Mega-conference on biomedical engineering. Materials of the 4th International Conference on the development of biomedical engineering. Ho Chi Minh City, 2012, pp. 354-357.

19. Korenevsky N. A., Al-Kasasbeh R. T., Ionescu F., Alshamasin M., Alkasasbe E., Smith A. P. Fuzzy determination of the level of a person's psychoemotional. Proceedings of IFMBE, 2013, vol. 40, IFMBE, pp. 213-216.

20. Al-Kasasbeh R., Alshamasin M., Korenevsky N., Kuzmin A., Ionescu F. Synthesis of fuzzy logic for forecasting and medical diagnostics based on the energy characteristics of acupuncture point. *Journal of Acupuncture and Meridian Research*, 2011, vol. 4, no. 3, pp. 175-182.

21. Bunyaev V. V., Korenevsky N. A. Metody poiska informativnykh proektsionnykh zon i sinteza nechetkikh reshayushchikh pravil dlya refleksodiagnostiki [Methods of searching for informative projection zones and synthesis of fuzzy decision rules for reflexology]. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2004, vol. 3, no. 3, pp. 175-178.

Информация об авторах / Information about the Authors

Шевцов Максим Викторович, начальник
отделения организации практик, Академия
Государственной противопожарной службы
МЧС России, г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: shevtsovmv@mail.ru

Maxim V. Shevtsov, Head of the Department
of the Organization of Practices, Academy
of State Fire Service of EMERCOM of Russia,
Moscow, Russian Federation,
e-mail: shevtsovmv@mail.ru

Стародубцева Лилия Викторовна, доцент
кафедры вычислительной техники,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: lilja-74@inbox.ru

Lilia V. Starodubtseva, Associate Professor
of the Department of Technical Education,
Southwest State University, Kursk,
Russian Federation,
e-mail: lilja-74@inbox.ru

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

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

Сергеева Снежана Сергеевна, студент
кафедры биомедицинской инженерии,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: snezanasergeeva33@gmail.com

Snezhana S. Sergeeva, Student of Department
of Biomedical Engineering, Southwest State
University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: snezanasergeeva33@gmail.com

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/>.