

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

**Юго-Западного
государственного университета**

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

Научный журнал

Том 13 № 3 / 2023

Proceedings

**of the Southwest
State University**

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

Scientific Journal

Vol. 13 № 3 / 2023



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

Научный рецензируемый журнал

Основан в 2011 г.

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

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

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

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

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

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

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

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

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

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

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Адрес учредителя, издателя и редакции:

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

Телефон: +7(4712) 22-25-26,

Факс: +7(4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:

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

ISSN 2223-1536 (Print)

Префикс DOI: 10.21869

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

© Юго-Западный государственный университет, 2023



Материалы журнала доступны
под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:

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

Подписка и распространение:

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

Периодичность: четыре раза в год

Свободная цена.

Оригинал-макет подготовлен О. А. Леоновой

Подписано в печать 29.09.2023. Формат 60×84/8.

Дата выхода в свет 08.12.2023.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 19,0.

Тираж 1000 экз. Заказ 61.

16+



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

Peer-reviewed scientific journal

Published since 2011

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

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

All papers are published free of charge.

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITOR-IN-CHIEF

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Founder and Publisher:

“Southwest State University”

Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:

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

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

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

E-mail: rio_kursk@mail.ru

The Journal is officially registered by:

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

ISSN 2223-1536 (Print)

DOI Prefix: 10.21869

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

Printing office:

Printing Center

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

Subscription and distribution:

the journal is distributed by subscription.
Subscription index 44288
in the General Catalogue “Pressa Rossii”

Frequency: Quarterly

Free price

Original lay-out design: O. A. Leonova

16+

© Southwest State University, 2023



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

Signed for printing 29.09.2023. Format 60×84/8.

Release date 08.12.2023.

Offset paper. Printer's sheets: 19,0.

Circulation 1000 copies. Order 61.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ 8

Оригинальные статьи

Корреляционные связи и алгоритмизация анализа цитокинового статуса пациентов с ишемической болезнью сердца в раннем периоде выздоровления после COVID-19 8

Негребецкий В. А., Гонтарев С. Н., Иванов В. А.

Формализованное информационное описание для медицинской экспертной системы 21

Нестерович С. А., Брежнева А. Н., Зырянова С. А.

Интеллектуальная система обеспечения миграции посредством динамической десериализации данных 31

Томакова Р. А., Иванов Д. В., Корсунский Н. А.

МЕХАТРОНИКА, РОБОТОТЕХНИКА..... 52

Оригинальные статьи

Двухэтапная математическая модель оценки режимов вынужденных вибраций элемента обшивки летательного аппарата с применением оптоволоконных технологий 52

Сизонов И. И., Барабушка А. С., Мухин И. Е.

Гибридный метод контроля мышечной усталости в робототехнической системе 64

Кузьмин А. А., Томакова Р. А., Петрунина Е. В., Ермаков Д. А., Кадырова С.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ..... 82

Оригинальные статьи

Количественная оценка защитных механизмов организма по энергетическому разбалансу меридианных структур..... 82

Кореневский Н. А., Шульга Л. В., Родионова С. Н., Разумова К. В., Рыбаков А. Ю.

МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ 102

Оригинальные статьи

Синтез моделей прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний на основе гибридной нечеткой технологии 102

Сафронов Р. И., Разумова К. В., Рыбаков А. Ю., Лях А. В.

Модель формирования динамической структуры для установления источника сообщений в памяти приемника 122

Чеснокова А. А.

Использование метапрограммных средств языка Common Lisp для разработки систем эмуляторов 135

Чаплыгин А. А.

Метод построения нечеткой когнитивной карты конкурентоспособности машиностроительного предприятия 146

Буйневич И. А., Криушина Ю. А., Халин Ю. А., Катыхин А. И., Криушин Е. А.

К сведению авторов..... 164

CONTENT

INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS	8
<i>Original articles</i>	
Correlations and Algorithmization of Cytokine Status Analysis of Patients with Coronary Heart Disease in the Early Recovery Period After COVID-19.....	8
<i>Negrebetskiy V. A., Gontarev S. N., Ivanov V. A.</i>	
Formalized Information Description for a Medical Expert System	21
<i>Nesterovich S. A., Brezhneva A. N., Zyryanova S. A.</i>	
Intelligent System for Providing Migration Through Dynamic Data Deserialization	31
<i>Tomakova R. A., Ivanov D. V., Korsunsky N. A.</i>	
MECHATRONICS, ROBOTICS	52
<i>Original articles</i>	
A Two-Stage Mathematical Model for Evaluating the Modes of Forced Vibrations of an Aircraft Skin Element with the Use of Fiber-Optic Technologies	52
<i>Sizonov I. I., Barabushka A. S., Mukhin I. E.</i>	
Hybrid Method for Controlling Muscle Fatigue in the Robotic System.....	64
<i>Kuzmin A. A., Tomakova R. A., Petrunina E. V., Ermakov D. A., Kadyrova S.</i>	
SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING	82
<i>Original articles</i>	
Quantitative Assessment of the Body's Defense Mechanisms by the Energy Imbalance of Meridian Structures	82
<i>Korenevsky N. A., Shulga L. V., Rodionova S. N., Razumova K. V., Rybakov A. Y.</i>	
MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS	102
<i>Original articles</i>	
Synthesis of Models for Predicting and Diagnosing Occupational Diseases Based on Hybrid Fuzzy Technology	102
<i>Safronov R. I., Razumova K. V., Rybakov A. Y., Lyakh A. V.</i>	
A Model of Forming a Dynamic Structure for Establishing the Source of Messages in the Receiver's Memory	122
<i>Chesnokova A. A.</i>	
Using Metaprogramming Tools of the Common Lisp Language for the Development of Emulator Systems	135
<i>Chaplygin A. A.</i>	
Method of Construction of a Fuzzy Cognitive Map of the Competitiveness of a Machine-Building Enterprise.....	146
<i>Buinevich I. A., Kriushina Yu. A., Khalin Yu. A., Katykhin A. I., Kriushin E. A.</i>	
Information for Authors	164

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-8-20>



УДК 614.8:251.37+816.59

Корреляционные связи и алгоритмизация анализа цитокинового статуса пациентов с ишемической болезнью сердца в раннем периоде выздоровления после COVID-19

В. А. Негребецкий¹, С. Н. Гонтарев², В. А. Иванов³ ✉

¹ Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н. И. Пирогова
ул. Островитянова, д. 1, г. Москва 117997, Российская Федерация

² Белгородский государственный национальный исследовательский университет
пр-т Победы, д. 85, г. Белгород 308015, Российская Федерация

³ Курский государственный медицинский университет Минздрава России
ул. Карла Маркса, д. 3, г. Курск 305041, Российская Федерация

✉ e-mail: va_vanov@mail.ru

Резюме

Цель исследования – изучение корреляционных связей и алгоритмизация анализа цитокинового статуса пациентов с ишемической болезнью сердца в раннем периоде выздоровления после COVID-19.

Методы. Изучение цитокинового статуса выполнено у 40 пациентов с ишемической болезнью сердца через 3-4 недели после выздоровления от COVID-19. Контролем служили 38 пациентов с ишемической болезнью сердца без COVID-19. Уровень цитокинов в крови определяли на аппарате Becton Dickinson FACS Canto 2 (USA). При статистическом анализе применялись корреляционный и регрессионный анализы.

Результаты. Установлены достоверные умеренные корреляционные связи между IL-6 и IL-2, IL-3, составляющие соответственно $r = 0,35$ и $r = 0,33$; IL-17 с IL-2 и IL-6 – $r = 0,28$ и $r = 0,63$ соответственно; TNF- α и IFN- γ с IL-6 – $r = 0,42$ и $r = 0,39$. При этом наибольшая ассоциация, согласно величинам коэффициентов корреляции, среди изученных интерлейкинов у пациентов с ИБС в период реконвалесценции характерна для IL-6. Вместе с тем IL-17 имел также значительное число корреляционных связей с рассматриваемыми цитокинами. Всё это указывает на высокую ассоциированность IL-6, IL-17 и IFN- γ с другими цитокинами в период выздоровления пациентов с ИБС после перенесенного COVID-19 и их приоритетное участие в развитии и выздоровлении данных пациентов. Для выделения наиболее информативных цитокинов крови разработан алгоритм анализа цитокинового статуса, который предусматривает разработку нескорректированных и скорректированных математических моделей по полу и возрасту пациентов с ИБС, перенесших COVID-19. Установлено, что наибольшее влияние на выздоровление через 3-4 недели после перенесенного COVID-19 у пациентов с ишемической болезнью сердца оказывает уровень IL-17 в крови ($OR = 1,792$, $p = 0,0021$) в нескорректированной и скорректированной по полу и возрасту модели ($OR = 1,708$, $p = 0,0012$).

Заключение. Установленные корреляционные связи, созданный алгоритм и модели предлагается использовать при оценке динамики выздоровления пациентов с ишемической болезнью сердца после COVID-19.

Ключевые слова: корреляционные связи; моделирование цитокинов; алгоритмизация; ассоциация цитокинов крови; COVID-19; ишемическая болезнь сердца.

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

Для цитирования: Негребецкий В. А., Гонтарев С. Н., Иванов В. А. Корреляционные связи и алгоритмизация анализа цитокинового статуса пациентов с ишемической болезнью сердца в раннем периоде выздоровления после COVID-19 // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 3. С. 8–20. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-8-20>.

Поступила в редакцию 11.07.2023

Подписана в печать 09.08.2023

Опубликована 29.09.2023

Correlations and Algorithmization of Cytokine Status Analysis of Patients with Coronary Heart Disease in the Early Recovery Period After COVID-19

Viktor A. Negrebetskiy¹, Sergey N. Gontarev², Viktor A. Ivanov³ ✉

¹ N. I. Pirogov Russian National Research Medical University
1 Ostrovityanova Str., Moscow 117997, Russian Federation

² Belgorod State National Research University
85 Pobedy Ave., Belgorod 308015, Russian Federation

³ Kursk State Medical University Ministry of Health of Russia
3 Karl Marx Str., Kursk 305041, Russian Federation

✉ e-mail: va_vanov@mail.ru

Abstract

The purpose of research is study of correlations and algorithmization of cytokine status analysis of patients with coronary heart disease in the early recovery period after COVID-19.

Methods. Cytokine status was studied in 40 patients with coronary heart disease 3-4 weeks after recovery from COVID-19. The control consisted of 38 patients with coronary heart disease without COVID-19. The level of cytokines in the blood was determined on the device "Becton Dickinson FACS Canto 2 (USA)". Correlation and regression analysis were used in statistical analysis.

Results. Reliable moderate correlations were established between IL-6 and IL-2, IL-3, respectively, $r = 0,35$ and $r = 0,33$; IL-17 with IL-2 and IL-6 – $r = 0,28$ and $r = 0,63$, respectively; TNF- α and IFN- γ with IL-6 – $r = 0,42$ and $r = 0,39$. At the same time, the greatest association, according to the values of the correlation coefficients, among the studied interleukins in patients with coronary heart disease during the convalescence period is characteristic of IL-6. However, IL-17 also had a significant number of correlations with the cytokines under consideration. All this indicates a high association of IL-6, IL-17 and IFN- γ with other cytokines during the recovery period of patients with coronary heart disease after COVID-19 and their priority participation in the development and recovery of these patients. To identify the most informative blood cytokines, an algorithm for analyzing the cytokine status has been developed, which provides for the development of uncorrected and adjusted mathematical models by gender and age of patients with coronary heart disease who have undergone COVID-19. It was found that the greatest effect on recovery 3-4 weeks after COVID-19 in patients with coronary heart disease has the level of IL-17 in the blood (OR = 1,792, $p = 0,0021$) in an uncorrected and adjusted by gender and age model (OR = 1,708, $p = 0,0012$).

Conclusion. The established correlations, algorithms and models created are proposed to be used in assessing the dynamics of recovery of patients with coronary heart disease after COVID-19.

Keywords: correlations; cytokine modeling; algorithmization; blood cytokine association; COVID-19; coronary heart disease.

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

For citation: Negrebetskiy V. A., Gontarev S. N., Ivanov V. A. Correlations and Algorithmization of Cytokine Status Analysis of Patients with Coronary heart Disease in the Early Recovery Period After COVID-19. *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*. 2023; 13(3): 8–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-8-20>.

Received 11.07.2023

Accepted 09.08.2023

Published 29.09.2023

Введение

Согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), с начала пандемии было зарегистрировано в общей сложности 663 млн случаев COVID-19 с летальностью примерно 1%, что привело к 6,7 млн смертельных случаев COVID-19 [1]. Продолжающиеся исследования показали, что COVID-19 является мультисистемным заболеванием, поражающим несколько систем органов человеческого организма; как таковое поражение сердечно-сосудистой системы (СС) было описано вскоре после вспышки [2]. С тех пор растущий объем фактических данных еще раз подчеркивает необходимость особого внимания к сердечно-сосудистой системе при раннем ведении пациентов с COVID-19, учитывая высокую частоту нежелательных сердечно-сосудистых событий [3]. Пациенты с COVID-19, и в частности с сердечно-сосудистыми заболеваниями в анамнезе, а также пациенты с повышенными уровнями биомаркеров сердечно-сосудистой системы (в первую очередь высокочувствительного сердечного тропонина I (hs-cTnI) и N-концевого

натрийуретического пептида про-В-типа (NT-proBNP)) подвергаются повышенному риску заболеваемости и смертности. В дополнение к сердечно-сосудистым заболеваниям при COVID-19 также встречались тромбоэмболические осложнения, такие как тромбоз глубоких вен или эмболия легочной артерии [4]. COVID-19 прочно зарекомендовала себя как полиорганное заболевание в целом, причем вирус приводит к таким осложнениям, как преэклампсия, мужское бесплодие и повреждение головного мозга, среди многих других [5]. Хотя появилось несколько теорий, предлагающих потенциальные объяснения связи сердечно-сосудистых заболеваний с COVID-19, прямой механизм еще не выяснен [6].

Концепция цитокинового шторма была предложена в качестве одного из основных факторов, влияющих на патофизиологический каскад тяжелой формы COVID-19 [7]. Несколько исследований показали значительное повышение уровня воспалительных цитокинов, таких как IL-3, IL-6 и IL-10, среди пациентов с тяжелым или летальным течением COVID-19 [8; 9; 10]. Нацеленное

на этот путь применение ингибитора IL-6, тоцилизумаба, привело к снижению клинических конечных точек у госпитализированных пациентов с COVID-19. Тоцилизумаб был одним из первых целевых вариантов лечения COVID-19, данные о котором появились на ранних стадиях пандемии [11]. Law et al. выдвинули гипотеза о потенциальной роли IL-32, IL-34 и IL-37 в проявлении сердечно-сосудистых осложнений при COVID-19 [12]. Авторы утверждали, что COVID-19 (в особенности в тяжелых случаях) способствует развитию атеросклероза посредством развития цитокиновой бури и последующей активации эндотелиальных клеток. Это, в свою очередь, может быть связано с IL-32 и IL-34, поскольку было показано, что оба биомаркера вносят вклад в процесс атеросклероза, причем IL-32 в основном через стимулирование ангиогенеза эндотелиальных клеток и модификацию липидных профилей, а IL-34 – через его ассоциацию с ожирением, хроническим воспалением и резистентностью к инсулину [13]. Более того, небольшое исследование 64 пациентов с COVID-19 показало, что концентрации IL-32 были ниже у пациентов с COVID-19 по сравнению со здоровыми контрольными группами. Однако не было обнаружено существенной разницы в зависимости от тяжести инфекции COVID-19 [14].

Однако изучение ограниченного числа системных цитокинов в вышеуказанных публикациях у больных COVID-19 не позволяет всесторонне оценить изменения и корреляционные связи между

цитокинами. Кроме того, в ранее выполненных исследованиях цитокины изучались преимущественно в острой фазе COVID-19 и практически отсутствуют сведения о соотношении цитокинов крови спустя 3-4 недели после выздоровления пациентов. Не осуществлялась также алгоритмизация системных цитокинов для выделения наиболее информативных среди пациентов, перенесших COVID-19.

Цель исследования – изучение корреляционных связей и алгоритмизация анализа цитокинового статуса пациентов с ишемической болезнью сердца в раннем периоде выздоровления после COVID-19.

Материалы и методы

Настоящее исследование проведено в 2021–2022 гг. в клинических условиях среди 40 пациентов в возрасте 40–50 лет – 12 человек, 51–55 лет – 10 человек и 56–59 лет – 18 человек, страдающих ИБС в течение длительного времени и перенесших COVID-19. Данные пациенты составили основную группу. Контрольной группой служили 38 пациентов аналогичного возраста с ИБС, но с отсутствием в период обследования и в анамнезе новой коронавирусной инфекции.

Обследование пациентов основной группы проводилось через 3-4 недели после выздоровления от COVID-19 средней тяжести и лабораторно подтвержденном отрицательном ПЦР-тесте на COVID-19.

Верификация ИБС в обеих клинических группах базировалась на выполненных результатах электрокардиографии, эхокардиографии, лабораторных исследований по выявлению специфических кардиомаркеров данного сердечно-сосудистого заболевания.

В вышеуказанных группах пациентов в плазме крови, полученной в утренние часы до приёма пищи, проводилось определение уровня цитокинов методом проточной цитометрии на аппарате Becton Dickinson FACS Canto 2 (USA).

У обследованных пациентов пожилого возраста ИБС находилась в стадии компенсации. Другие сопутствующие соматические наиболее распространённые заболевания также находились в стадии компенсации, что исключало их возможное влияние на результаты настоящего исследования.

При оценке сопряжённости системных цитокинов у пациентов с ишемической болезнью сердца и перенесённым COVID-19 применялся корреляционный метод в рамках программы Statistica 10.0.

Статистически значимыми считались коэффициенты корреляции при $p < 0,05$, которые использовались при последующем анализе.

Для выявления наиболее информативных цитокинов крови, ассоциированных с выздоровлением пациентов с ишемической болезнью сердца, разработан алгоритм анализа провоспалительных и противовоспалительных цитокинов крови. По наиболее информативным цитокинам крови и посредством регрессионного анализа разработаны нескорректированные и скорректированные модели.

Результаты и их обсуждение

Изучение корреляционных связей среди широкого спектра системных цитокинов у пожилых пациентов, страдающих ИБС, после выздоровления от COVID-19 средней степени тяжести выявило наличие значительного количества статистически значимых корреляций между рассматриваемыми цитокинами крови (табл. 1).

Таблица 1. Корреляционные связи между содержанием различных цитокинов у пациентов пожилого возраста с ИБС после перенесённого COVID-19 в ранние сроки выздоровления

Table 1. Correlations between the content of various cytokines in elderly patients with coronary heart disease after COVID-19 in the early stages of recovery

Цитокин	IL-2	IL-3	IL-4	IL-6	IL-7	IL-15	IL-17	IL-18	TNF- α	IFN- γ
IL-2	1,00									
IL-3	0,28*	1,00								
IL-4	0,09	0,12	1,00							
IL-6	0,35*	0,33*	0,17	1,00						
IL-7	0,11	0,14	0,08	0,29*	1,00					
IL-15	0,03	0,06	0,10	0,22	0,14	1,00				
IL-17	0,28*	0,24	0,11	0,63*	0,40	0,21	1,00			
IL-18	-0,07	-0,09	-0,06	-0,11	-0,08	-0,05	-0,09	1,00		
TNF- α	0,14	0,13	0,02	0,42*	0,09	0,04	0,35*	0,04	1,00	
IFN- γ	0,11	0,08	0,03	0,39*	0,02	0,03	0,36*	0,05	0,29*	1,00

*Статистически достоверная величина.

При этом наибольшее количество достоверных корреляционных связей выявлено между IL-6 и содержанием в плазме крови пациентов, перенесших коронавирусную инфекцию средней тяжести, через 3–4 недели после выздоровления. Так, прямая средняя достоверная связь установлена между содержанием IL-6 с уровнем в плазме крови реконвалесцентов IL-2, IL-3. IL-6 на системном уровне в раннем периоде выздоровления имел также прямую статистически значимую корреляцию с IFN- γ и TNF- α . Слабая прямая – статистически значимая корреляция IL-6 установлена с IL-7. Однако наибольшая ассоциация среди корреляционных связей IL-6 на системном уровне у пациентов пожилого возраста с ИБС, перенесших COVID-19, установлена с IL-17, когда величина коэффициента корреляции составляла +0,63 ($p < 0,01$).

Показано наличие прямой слабой достоверной связи между содержанием в плазме крови пожилых реконвалесцентов IL-3 и IL-2. IL-7 имел прямую статистически значимую корреляционную связь с IL-6. Несмотря на наличие слабых соотношений прямой направленности в рассматриваемой группе пациентов между IL-15 с другими изученными цитокинами в крови, корреляции оказались недостоверными ($p > 0,05$). Вместе с тем IL-17 имел значительное количество прямых корреляционных связей с

исследованными другими цитокинами, а именно с IL-2, IL-6, IL-7, IL-15, хотя достоверные прямые средние корреляции установлены только с IL-6 и IL-7, а достоверные слабые связи – с IL-2. В остальных случаях IL-17 с IL-3, IL-15 имел прямые слабые статистически незначимые ассоциации ($p > 0,05$). Две прямые статистически значимые корреляционные связи установлены между содержанием в плазме крови TNF- α с IL-6 и IL-17. Несколько выше сопряжённость по числу достоверных связей IFN- γ и исследованными цитокинами, с которыми IFN- γ имеет две прямые средние достоверные связи (IL-6 и IL-17) и прямую слабую достоверную связь с TNF- α . Не имел статистически достоверных ассоциаций IL-4, IL-15 и IL-18, хотя некоторые рассмотренные ранее цитокины характеризуются единичными корреляциями – IL-7, TNF- α . Проведенный корреляционный анализ связей системных цитокинов у пожилых пациентов с ИБС в ранние сроки выздоровления после COVID-19 показал высокую по числу корреляций ассоциативность IL-6, IL-17 и IFN- γ с другими рассматриваемыми цитокинами.

Выделение наиболее информативных цитокинов крови у обследованных пациентов проводится в соответствии с разработанным нами алгоритмом анализа цитокинового статуса (рис. 1).



Рис. 1. Алгоритм анализа цитокинового статуса пациентов с ишемической болезнью сердца (ИБС) в раннем периоде выздоровления после COVID-19

Fig. 1. Algorithm for analyzing the cytokine status of patients with coronary heart disease (CHD) in the early recovery period after COVID-19

Проведенная алгоритмизация анализа цитокинов крови у пациентов с ишемической болезнью сердца в раннем периоде выздоровления после перенесенного COVID-19 и вышеперассмотренные результаты корреляционного анализа позволяют считать, что наибольшей сопряженностью среди изучаемых

системных цитокинов обладают TNF- α , IFN- γ , IL-17 и IL-6. Для данных системных цитокинов посредством метода логистической регрессии (регрессионного анализа) разработаны нескорректированные и скорректированные с учётом пола и возраста пациентов модели (табл. 2).

Таблица 2. Нескорректированные и скорректированные модели для TNF- α , IFN- γ , IL-17 и IL-6 у пациентов с ишемической болезнью сердца в ранние сроки выздоровления после перенесенного COVID-19

Table 2. Uncorrected and corrected models for TNF- α , IFN- γ , IL-17 and IL-6 in patients with coronary heart disease in the early stages of recovery after COVID-19

Цитокин / Cytokine	Модель нескорректированная / The model is uncorrected			Модель скорректированная / Adjusted model		
	OR	ДИ	p	OR	ДИ	p
TNF- α	1,586	1,305–1,829	0,0023	1,362	1,228–1,643	0,0031
IFN- γ	1,425	1,312–1,718	0,0034	1,315	1,132–1,496	0,0029
IL-17	1,792	1,543–1,947	0,0021	1,708	1,614–1,915	0,0012
IL-6	1,279	1,084–1,538	0,0036	1,204	1,035–1,448	0,0048

Построенные регрессионные модели как нескорректированные, так и скорректированные показывают ассоциацию TNF- α , IFN- γ , IL-17 и IL-6 с процессом выздоровления пациентов с ишемической болезнью сердца через 3-4 недели после COVID-19. При этом наибольшее влияние на выздоровление таких пациентов оказывает содержание в крови IL-17.

В предыдущем исследовании [15] установлено, что уровень IL-32 в крови имел с IL-34 прямую среднюю связь, когда $r = +0,332$ ($p < 0,001$). В этом проспективном исследовании впервые были изучены IL-32 и IL-34 при поступлении в больницу пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями, в т. ч. с ишемической болезнью сердца и COVID-19.

Однако не было обнаружено связи между IL-32, IL-34 и сердечно-сосудистыми заболеваниями и влиянии данных цитокинов на смертность госпитализированных пациентов от COVID-19 в течение 4 недель. Нами же через 3-4 недели после выздоровления пациентов с ишемической болезнью сердца после COVID-19 выявлены корреляционные связи между различными системными цитокинами. В исследовании же [15] выявлено влияние сердечно-сосудистых заболеваний на смертность пациентов от COVID-19, но не IL-32 и IL-34, которые не имели прогностического значения в оценке исходов COVID-19 среди пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями.

Недавние исследования показали, что IL-32 и IL-34 играют определённую роль в отдельных популяциях пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями и идентифицировали IL-32 как потенциальный биомаркер лёгочной артериальной гипертензии, а также показали связь с ишемической болезнью сердца [16]. Аналогичным образом IL-34 был установлен в качестве прогностического биомаркера как при ишемической болезни сердца, так и при сердечной недостаточности [17; 18]. Law C. C. et al. выдвинули гипотезу, что IL-32, IL-34 и IL-37 могут способствовать проявлениям осложнения при COVID-19 [12].

У пациентов с ИБС, артериальной гипертензией и с COVID-19 в плазме крови выявлены повышенные уровни IL-1 β и IFN- γ , хемоаттрактантного белка моноцитов 1 (MCP-1) гранулоцитарно-макрофагального колониестимулирующего фактора и IFN- γ – индуцируемого белка 10 (IP-10) [14]. При этом у пациентов, проходивших лечение в отделении интенсивной терапии в тяжёлом состоянии, выявлено более выраженное увеличение IL-2, IL-7 и IL-10 по сравнению с

пациентами с лёгкой формой COVID-19 [19; 20].

Выводы

В раннем периоде выздоровления пожилых пациентов с ИБС, перенесших COVID-19, среди изученных цитокинов плазмы крови наблюдаются статистически значимые корреляционные связи, но наиболее множественные и сильные ассоциации установлены для IL-6, IL-17 и IFN- γ , TNF- α , которые можно использовать в качестве маркеров протекания восстановительного периода в указанной категории пациентов. Разработанный алгоритм позволяет с учётом величин коэффициентов корреляции системных цитокинов позволяет обратить наиболее информативные цитокины крови для разработки регрессионных моделей. Созданные нескорректированные и скорректированные модели показывают ассоциацию системных цитокинов с выздоровлением пациентов через 3-4 недели после перенесенного COVID-19, среди которых наибольшее влияние на выздоровление имеет уровень IL-17.

Список литературы

1. The Socio-Economic Implications of the Coronavirus Pandemic (COVID-19): A Review / M. Nicola, Z. Alsafi, C. Sohrabi, A. Kerwan, A. Al-Jabir, C. Iosifidis, M. Agha, R. Agha // *Int. J. Surg.* 2020. N 78. P. 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.ijssu.2020.04.018>.
2. Cardiac Involvement of COVID-19: A Comprehensive Review / W. T. Chang, H. S. Toh, C. T. Liao, W. L. Yu // *Am. J. Med. Sci.* 2021. N 361. P. 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.amjms.2020.10.002>.
3. Long-Term Cardiovascular Outcomes of COVID-19 / Y. Xie, E. Xu, B. Bowe, Z. Al-Aly // *Nat. Med.* 2022. N 28. P. 583–590. <https://doi.org/10.1038/s41591-022-01689-3>.

4. Deep Vein Thrombosis in Hospitalized Patients With COVID-19 in Wuhan, China: Prevalence, Risk Factors, and Outcome / L. Zhang, X. Feng, D. Zhang, C. Jiang, H. Mei, J. Wang, C. Zhang, H. Li, X. Xia, S. Kong [et al.] // *Circulation*. 2020. N 142. P. 114–128. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.120.046702>.

5. Could SARS-CoV-2 Infection Affect Male Fertility and Sexuality? / M. N. Delli, F. Finocchi, G. Tossetta, G. Salvio, M. Cutini, D. Marzioni, G. Balercia // *APMIS*. 2022. № 130. P. 243–252. <https://doi.org/10.1111/apm.13210>.

6. Mortality and High Risk of Major Adverse Events in Patients with COVID-19 and History of Cardiovascular Disease / E. Tessitore, D. Carballo, A. Poncet, N. Perrin, C. Follonier, B. Assouline, S. Carballo, F. Girardin, F. Mach // *Open Heart*. 2021. N 8. P. e001526. <https://doi.org/10.1136/openhrt-2020-001526>.

7. The Pathogenesis and Treatment of the Cytokine Storm in COVID-19 / Q. Ye, B. Wang, J. Mao // *J. Infect.* 2020. N 80. P. 607–613. <https://doi.org/10.1016/j.jinf.2020.03.037>.

8. Interleukin-3 Is a Predictive Marker for Severity and Outcome during SARS-CoV-2 Infections / A. Bénard, A. Jacobsen, M. Brunner, C. Krautz, B. Klösch, I. Swierzy, E. Naschberger, M. J. Podolska, D. Kouhestani, P. David [et al.] // *Nat. Commun.* 2021. N 12. P. 1112. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21310-4>.

9. Особенности постуральных нарушений и связей с системой комплемента крови при синдром падений у пожилых / Т. С. Гурко, Н. М. Агарков, И. В. Лев, Е. Н. Коровин, Х. Ф. Леон // *Научные результаты биомедицинских исследований*. 2022. Т. 8, № 2. С. 259–267. <https://doi.org/10.18413/2658-6533-2022-8-2-0-10>.

10. The Role of Cytokines Including Interleukin-6 in COVID-19 Induced Pneumonia and Macrophage Activation Syndrome-Like Disease / D. McGonagle, K. Sharif, A. O'Regan, C. Bridgewood // *Autoimmun. Rev.* 2020. N 19. P. 102537. <https://doi.org/10.1016/j.autrev.2020.102537>.

11. Tocilizumab in Patients Hospitalized with COVID-19 Pneumonia / C. Salama, J. Han, L. Yau, W. G. Reiss, B. Kramer, J. D. Neidhart, G. J. Criner, E. Kaplan-Lewis, R. Baden, L. Pandit [et al.] // *N. Engl. J. Med.* 2021. N 384. P. 20–30. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2030340>.

12. Clinical Implications of IL-32, IL-34 and IL-37 in Atherosclerosis: Speculative Role in Cardiovascular Manifestations of COVID-19 / C. C. Law, R. Puranik, J. Fan, J. Fei, B. D. Hambly, S. Bao // *Front. Cardiovasc. Med.* 2021. N 8. P. 630767. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2021.630767>.

13. Interleukin-34 Levels Are Increased in Acute Myocardial Infarction and Associated with Major Adverse Cardiovascular Events / M. Kashiwagi, Y. Ozaki, T. Imanishi, A. Taruya, A. Kuroi, Y. Katayama, K. Shimamura, Y. Shiono, T. Tanimoto, T. Kubo // *Coron. Artery Dis.* 2022. N 31. P. 61–63. <https://doi.org/10.1097/MCA.0000000000001046>.

14. Cytokine Profiles in the Detection of Severe Lung Involvement in Hospitalized Patients with COVID-19: The IL-8/IL-32 Axis / L. Bergantini, M. d'Alessandro, P. Cameli,

A. Otranto, S. Luzzi, F. Bianchi, E. Bargagli // *Cytokine*. 2022. N 151. P. 155804. <https://doi.org/10.1016/j.cyto.2022.155804>.

15. Biomarkers Associated with Cardiovascular Disease in COVID-19 / C. C. Kaufmann, A. Ahmed, A. L. Burger, M. Muthspiel, B. Jäger, J. Wojta, K. Huber // *Cells*. 2022. N 11. P. 922. <https://doi.org/10.3390/cells11060922>.

16. Interleukin-32 Increases in Coronary Arteries and Plasma from Patients with Coronary Artery Disease / Z. Yang, L. Shi, Y. Xue, T. Zeng, Y. Shi, Y. Lin, L. Liu // *Clin. Chim. Acta*. 2019. N 497. P. 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.cca.2019.07.019>.

17. Interleukin-32 in Systemic Sclerosis, a Potential New Biomarker for Pulmonary Arterial Hypertension / P. Di Benedetto, G. Guggino, G. Manzi, P. Ruscitti, O. Berardicurti, N. Panzera, N. Grazia, R. Badagliacca, V. Ricciari, C. D. Vizza [et al.] // *Arthritis Res. Ther*. 2020. N 22. P. 127. <https://doi.org/10.1186/s13075-020-02218-8>.

18. Oldroyd K. G., Rush C. J., Berry C. Prevalence of Coronary Artery Disease and Coronary Microvascular Dysfunction in Patients With Heart Failure With Preserved Ejection Fraction // *JAMA Cardiol*. 2021. N 6(10). P. 1130–1143. <https://doi.org/10.1001/jamacardio.2021.1825>.

19. Clarke R., Valses-Marquez E., Hill M. Plasma cytokines and risk of coronary heart disease in the PROCARDIS study // *Open Heart*. 2018. N 5(1). P. e000807. <https://doi.org/10.1136/openhrt-2018-000807>.

20. Yang L., Wang L., Deng Y. Serum lipids profiling perturbances in patients with ischemic heart disease and ischemic cardiomyopathy // *Lipids Health Dis*. 2020. N 19(1). P. 89. <https://doi.org/10.1186/s12944-020-01269-9>.

References

1. Nicola M., Alsafi Z., Sohrabi C., Kerwan A., Al-Jabir A., Iosifidis C., Agha M., Agha R. The Socio-Economic Implications of the Coronavirus Pandemic (COVID-19): A Review. *Int. J. Surg*, 2020, no. 78, pp. 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.ijssu.2020.04.018>

2. Chang W. T., Toh H. S., Liao C. T., Yu W. L. Cardiac Involvement of COVID-19: A Comprehensive Review. *Am. J. Med. Sci.*, 2021, no. 361, pp. 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.amjms.2020.10.002>

3. Xie Y., Xu E., Bowe B., Al-Aly Z. Long-Term Cardiovascular Outcomes of COVID-19. *Nat. Med.*, 2022, no. 28, pp. 583–590. <https://doi.org/10.1038/s41591-022-01689-3>

4. Zhang L., Feng X., Zhang D., Jiang C., Mei H., Wang J., Zhang C., Li H., Xia X., Kong S., eds. Deep Vein Thrombosis in Hospitalized Patients With COVID-19 in Wuhan, China: Prevalence, Risk Factors, and Outcome. *Circulation*, 2020, no. 142, pp. 114–128. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.120.046702>

5. Delli M. N., Finocchi F., Tossetta G., Salvio G., Cutini M., Marzioni D., Balercia G. Could SARS-CoV-2 Infection Affect Male Fertility and Sexuality? *APMIS*, 2022, no. 130, pp. 243–252. <https://doi.org/10.1111/apm.13210>

6. Tessitore E., Carballo D., Poncet A., Perrin N., Follonier C., Assouline B., Carballo S., Girardin F., Mach F. Mortality and High Risk of Major Adverse Events in Patients with COVID-19 and History of Cardiovascular Disease. *Open Heart*, 2021, no. 8, p. e001526. <https://doi.org/10.1136/openhrt-2020-001526>
7. Ye Q., Wang B., Mao J. The Pathogenesis and Treatment of the Cytokine Storm in COVID-19. *J. Infect*, 2020, no. 80, pp. 607–613. <https://doi.org/10.1016/j.jinf.2020.03.037>
8. Bénard A., Jacobsen A., Brunner M., Krautz C., Klösch B., Swierzy I., Naschberger E., Podolska M. J., Kouhestani D., David P., et al. Interleukin-3 Is a Predictive Marker for Severity and Outcome during SARS-CoV-2 Infections. *Nat. Commun*, 2021, no. 12, pp. 1112. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21310-4>
9. Gurko T. S., Agarkov N. M., Lev I. V., Korovin E. N., Leon H. F. Osobennosti postural'nyh narushenij i svyazej s sistemoj komplementa krovi pri sindrom padenij u pozhilyh [Features of postural disorders and connections with the blood complement system in falls syndrome in the elderly]. *Nauchnye rezul'taty biomedicinskih issledovanij = Research Results in Biomedicine*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 259–267. <https://doi.org/10.18413/2658-6533-2022-8-2-0-10>
10. McGonagle D., Sharif K., O'Regan A., Bridgewood C. The Role of Cytokines Including Interleukin-6 in COVID-19 Induced Pneumonia and Macrophage Activation Syndrome-Like Disease. *Autoimmun. Rev.*, 2020, no. 19, pp. 102537. <https://doi.org/10.1016/j.autrev.2020.102537>
11. Salama C., Han J., Yau L., Reiss W. G., Kramer B., Neidhart J. D., Criner G. J., Kaplan-Lewis E., Baden R., Pandit L., eds. Tocilizumab in Patients Hospitalized with COVID-19 Pneumonia. *N. Engl. J. Med.*, 2021, no. 384, pp. 20–30. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2030340>
12. Law C. C., Puranik R., Fan J., Fei J., Hambly B. D., Bao S. Clinical Implications of IL-32, IL-34 and IL-37 in Atherosclerosis: Speculative Role in Cardiovascular Manifestations of COVID-19. *Front. Cardiovasc. Med.*, 2021, no. 8, p. 630767. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2021.630767>
13. Kashiwagi M., Ozaki Y., Imanishi T., Taruya A., Kuroi A., Katayama Y., Shimamura K., Shiono Y., Tanimoto T., Kubo T. Interleukin-34 Levels Are Increased in Acute Myocardial Infarction and Associated with Major Adverse Cardiovascular Events. *Coron. Artery Dis*, 2022, no. 31, pp. 61–63. <https://doi.org/10.1097/MCA.0000000000001046>
14. Bergantini L., d'Alessandro M., Cameli P., Otranto A., Luzzi S., Bianchi F., Bargagli E. Cytokine Profiles in the Detection of Severe Lung Involvement in Hospitalized Patients with COVID-19: The IL-8/IL-32 Axis. *Cytokine*, 2022, no. 151, p. 155804. <https://doi.org/10.1016/j.cyto.2022.155804>
15. Kaufmann C. C., Ahmed A., Burger A. L., Muthspiel M., Jäger B., Wojta J., Huber K. Biomarkers Associated with Cardiovascular Disease in COVID-19. *Cells*, 2022, no. 11, p. 922. <https://doi.org/10.3390/cells11060922>
16. Yang Z., Shi L., Xue Y., Zeng T., Shi Y., Lin Y., Liu L. Interleukin-32 Increases in Coronary Arteries and Plasma from Patients with Coronary Artery Disease. *Clin. Chim. Acta*, 2019, no. 497, pp. 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.cca.2019.07.019>

17. Di Benedetto P., Guggino G., Manzi G., Ruscitti P., Berardicurti O., Panzera N., Grazia N., Badagliacca R., Ricciari V., Vizza C. D., eds. Interleukin-32 in Systemic Sclerosis, a Potential New Biomarker for Pulmonary Arterial Hypertension. *Arthritis Res. Ther.*, 2020, no. 22, p. 127. <https://doi.org/10.1186/s13075-020-02218-8>
18. Oldroyd K. G., Rush C. J., Berry C. Prevalence of Coronary Artery Disease and Coronary Microvascular Dysfunction in Patients With Heart Failure With Preserved Ejection Fraction. *JAMA Cardiol.*, 2021, no. 6(10), pp. 1130–1143. <https://doi.org/10.1001/jamacardio.2021.1825>
19. Clarke R., Valses-Marquez E., Hill M. Plasma cytokines and risk of coronary heart disease in the PROCARDIS study. *Open Heart*, 2018, no. 5(1), p. e000807. <https://doi.org/10.1136/openhrt-2018-000807>
20. Yang L., Wang L., Deng Y. Serum lipids profiling perturbances in patients with ischemic heart disease and ischemic cardiomyopathy. *Lipids Health Dis.*, 2020, no. 19(1), p. 89. <https://doi.org/10.1186/s12944-020-01269-9>

Информация об авторах / Information about the Authors

Негребецкий Виктор Анатольевич, ординатор, Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н. И. Пирогова, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: negrebeckiy99@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5318-1544

Viktor A. Negrebetskiy, Resident, N. I. Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russian Federation, e-mail: negrebeckiy99@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5318-1544

Гонтарев Сергей Николаевич, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой детской стоматологии, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: znamisng@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5607-5747

Sergey N. Gontarev, Dr. of Sci. (Medical), Professor, Head of the Department of Pediatric Dentistry, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, e-mail: znamisng@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5607-5747

Иванов Виктор Афанасьевич, доктор медицинских наук, профессор кафедры анатомии человека, Курский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: va_ivanov@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2943-6858

Viktor A. Ivanov, Dr. of Sci. (Medical), Professor of the Department of Human Anatomy, Kursk State Medical University Ministry of Health of Russia, Kursk, Russian Federation, e-mail: va_ivanov@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2943-6858

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-21-30>



УДК 004.891

Формализованное информационное описание для медицинской экспертной системы

С. А. Нестерович¹, А. Н. Брежнева²✉, С. А. Зырянова¹

¹ Московский государственный университет технологий и управлений
им. К. Г. Разумовского (Первый казачий университет)
ул. Земляной Вал, д. 73, г. Москва 109004, Российская Федерация

² Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова
Стремянный пер., д. 36, г. Москва 117997, Российская Федерация

✉ e-mail: brezhneva.an@rea.ru

Резюме

Цель исследований. Информационное описание о состоянии здоровья пациента основывается на количественных параметрах и качественных признаках. Предлагается формализовать количественную и качественную информацию о состоянии здоровья пациента с целью использования этой информации, для построения медицинской экспертной системы. Построенная на основе этой информации экспертная система сможет точнее ставить диагноз, что сократит время на постановку диагноза и в конечном итоге повысит эффективность лечения.

Методы. На основе формализованного информационного описания о состоянии здоровья пациентов можно построить классы состояний: класс текущего состояния (на данный момент), класс эталонного (здорового) состояния здоровья пациента. В дальнейшем можно построить классы состояний здоровья пациентов с учетом возраста и ряда особенностей заболеваний, например, с учетом местности, в которой проживает пациент, и т. д. В дальнейшем эти классы могут быть реализованы в медицинской экспертной системе.

Результаты. В результате построена формализованная информационная модель описания состояния здоровья пациента на основе количественных параметров и качественных признаков, которая сможет быть основой для базы данных и базы знаний медицинской экспертной системы диагностирования.

Заключение. В результате предложено формализованное описание состояния здоровья пациента. Для реализации необходимо предусмотреть возможность построения отдельного эвристического алгоритма при диагностировании заболевания, который будет связан с воспроизведением в форме операций процесса разработки логической структуры при рассуждении экспертом (врачом) в ходе лечения пациента.

Ключевые слова: интеллектуальные системы; системы контроля; системы диагностики; экспертные системы; качественные и количественные характеристики исследуемого объекта; достоверность; знания экспертов.

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

Для цитирования: Формализованное информационное описание для медицинской экспертной системы / С. А. Нестерович, К. Г. Разумовского, А. Н. Брежнева, С. А. Зырянова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 3. С. 21–30. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-21-30>.

Поступила в редакцию 05.07.2023

Подписана в печать 02.08.2023

Опубликована 29.09.2023

© Нестерович С. А., Брежнева А. Н., Зырянова С. А., 2023

Formalized Information Description for a Medical Expert System

Sergey A. Nesterovich¹, Aleksandra N. Brezhneva² ✉, Svetlana A. Zyryanova¹

¹ K. G. Razumovsky Moscow State University of Technology and Management (First Cossack University)
73 Zemlyanoy Val Str, 109004 Moscow, Russian Federation

² Plekhanov Russian University of Economics
36 Stremyanny side-street, 117997 Moscow, Russian Federation

✉ e-mail: brezhneva.an@rea.ru

Abstract

The purpose of research. The information description of the patient's health status is based on quantitative parameters and qualitative signs. It is proposed to formalize quantitative and qualitative information about the patient's state of health in order to use this information to build a medical expert system. The expert system built on the basis of this information will be able to make a more accurate diagnosis, which will reduce the time for diagnosis and ultimately increase the effectiveness of treatment.

Methods. On the basis of a formalized information description of the state of health of patients, it is possible to construct classes of states: the class of the current state (at the moment), the class of the reference (healthy) state of health of the patient. In the future, it is possible to build classes of patients' health conditions taking into account age and a number of features of diseases, for example, taking into account the area in which the patient lives, etc. In the future, these classes can be implemented in a medical expert system.

Results. As a result, a formalized information model of describing the patient's health status based on quantitative parameters and qualitative signs has been built, which can be the basis for a database and knowledge base of a medical expert diagnostic system.

Conclusion. As a result, a formalized description of the patient's state of health is proposed. For implementation, it is necessary to provide for the possibility of constructing a separate heuristic algorithm for the diagnosis of the disease, which will be associated with the reproduction in the form of operations of the process of developing a logical structure when reasoning by an expert (doctor) during the treatment of a patient.

Keywords: intelligent systems; control systems; diagnostic systems; expert systems; qualitative and quantitative characteristics of the object under study; reliability; expert knowledge.

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

For citation: Nesterovich S. A., Brezhneva A. N., Zyryanova S. A. Formalized Information Description for a Medical Expert System. *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*. 2023; 13(3): 21–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-21-30>.

Received 05.07.2023

Accepted 02.08.2023

Published 29.09.2023

Введение

Диагностика медицинских заболеваний не стоит на месте. Появляются новые методы выявления заболеваний на ранних этапах. Эти методы строятся на

современных технологиях. Все чаще используются технологии искусственного интеллекта [1; 2]. Одной из технологий искусственного интеллекта являются экспертные системы.

Экспертная система (ЭС) – это компьютерная программа, которая содержит и аккумулирует знания экспертов (высококласных специалистов) в конкретной предметной области и на основе этих знаний может принять верное самостоятельное решение [3; 4; 5; 6].

Они применяются в различных сферах деятельности человека, в т. ч. в медицине [3; 7; 8; 9; 10; 11].

Важно при диагностировании заболеваний учесть как можно больше факторов о самочувствии пациента. Этими факторами могут быть показания приборов: данные анализов, МРТ, ЭКГ, размеры на снимках рентгена и флюорографии и т. д. В дальнейшем назовем их «параметры», т. е. это те параметры, которые имеют количественную оценку, их можно измерить.

Также существуют качественные показатели. Это такие показатели, которые не имеют количественной оценки. Их трудно, а бывает невозможно оценить количественно ввиду отсутствия необходимого оборудования их оценки. Например, слабость, раздражение, головокружение, тошнота, недомогание и т. д. Эти показатели будем называть качественными признаками. Для этих признаков нет приборов, которые их могут оценить количественно. Такие качественные признаки обнаруживает в себе пациент. Например, легкое головокружение, сильная слабость и т. д. Данные признаки могут быть легко оценены с помощью нечетких множеств [5; 7; 9; 11; 12; 13; 14; 15].

Материалы и методы

Имея количественные параметры и качественные признаки, можно полу-

чить информационное описание о состоянии здоровья пациента $\tilde{I}_S$, из которого будет формироваться база знаний и база данных медицинской экспертной системы:

$$\tilde{I}_S = \{\tilde{I}'_S, \tilde{I}^*_S\},$$

где $\tilde{I}'_S$ – информационное описание состояния здоровья пациента по количественным параметрам; $\tilde{I}^*_S$ – информационное описание состояния здоровья пациента по качественным признакам.

Ставится актуальная задача о создании медицинской экспертной системы, которая на основе расширенного информационного описания $\tilde{I}_S$ о состоянии здоровья пациента сможет поставить более точный диагноз.

Другой важной возможностью данной системы является использование ее как системы поддержки принятия решений специалистами при выполнении профессиональных задач, при принятии правильного решения, особенно тогда, когда есть ограничения во времени и существуют факторы, связанные с неточность и неопределенностью.

Неопределенность характерна для реальной системы знаний, которые плохо представляются в формальных системах [12; 13; 16; 17; 18].

Информационная модель описания состояния пациентов будет складываться из информационного описания текущего состояния по количественным параметрам и из текущего описания по качественным признакам.

Количество и состав качественных и количественных характеристик можно выбрать с помощью экспертных оценок на основе метода Делфи. В состав экспертной группы для отбора следует

отобрать от 7 до 9 экспертов. Характеристики группы экспертов определяются на основе индивидуальных их характеристик: компетентности, креативности, отношения к экспертизе, конформизма, конструктивности мышления, согласованности, самокритичности [4].

Диагностику заболевания необходимо проводить пациенту, у которого в явной и неявной форме выражены качественные (отек, покраснение, зуд, ломота, нервозность, хрипы и т. д.) признаки и количественные параметры (температура, изменение состава крови, данные КТ и МРТ и т. д.) заболевания, в условиях клинической диагностики.

Все эти данные необходимо привести к количественной оценке. Например, можно использовать последовательности обработки матрицы парных сравнений для m -экспертов. Для этого необходимо построить матрицу оценок всех пар объектов, а затем по ней вычислить вектор коэффициентов относительной важности. На основе этого вектора получится информационное описание состояния здоровья пациента с учетом значений по каждому параметру и признаку:

$$\begin{aligned} \tilde{I}'_s &= \{\pi'_s(\Pi'_{s_1}), \pi'_s(\Pi'_{s_2}), \dots, \pi'_i(\Pi'_{s_i}), \dots, \pi'_n(\Pi'_{s_n})\}, \\ \tilde{I}^*_s &= \{\pi^*_1(\Pi^*_{s_1}), \pi^*_2(\Pi^*_{s_2}), \dots, \pi^*_j(\Pi^*_{s_j}), \dots, \pi^*_k(\Pi^*_{s_k})\}, \\ i &= \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, k}. \end{aligned}$$

где π'_i – название текущего i -го количественного параметра, например *Давление*; Π'_{s_i} – значение текущего i -го количественного параметра, например *130/100*; π^*_j – название текущего j -го качественного признака, например *Дрожь в руках*; $\Pi^*_{s_j}$ – значение текущего j -го качественного признака, например *Сильная дрожь в руках*.

Знак «~» будет указывать на то, что мы имеем дело с неопределенностью исходной информации о состоянии здоровья пациента.

Например, *Дрожь* может определяться термом = {нет_дрожи, слабая_дрожь, средняя_дрожь, сильная_дрожь}.

Затем нужно сформировать класс состояние здоровья «здорового человека», он будет эталонным классом ($\tilde{I}_\varnothing$). С этим классом будет происходить сравнение. Представим его в виде множества:

$$\tilde{I}_\varnothing = \{\tilde{I}'_\varnothing, \tilde{I}^*_\varnothing\},$$

где $\tilde{I}'_\varnothing$ – название информационного описания состояния здоровья пациента на основе количественных параметров как эталонное, например *Давление*;

$\tilde{I}^*_\varnothing$ – название информационного описания состояния здоровья пациента на основе качественных признаков как эталонное, например *Дрожь в руках*.

Тогда информационные описания эталонного состояния здоровья пациента с учетом их значений по каждому параметру и признаку

$$\begin{aligned} \tilde{I}'_\varnothing &= \{\pi'_1(\Pi'_\varnothing), \pi'_2(\Pi'_\varnothing), \dots, \\ &\quad \pi'_i(\Pi'_\varnothing), \dots, \pi'_n(\Pi'_\varnothing)\}, \\ \tilde{I}^*_\varnothing &= \{\pi^*_1(\Pi^*_\varnothing), \pi^*_2(\Pi^*_\varnothing), \dots, \\ &\quad \pi^*_j(\Pi^*_\varnothing), \dots, \pi^*_k(\Pi^*_\varnothing)\}, \\ i &= \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, k}, \end{aligned}$$

где π^*_i – название текущего i -го количественного параметра, например *Давле-*

ние; $\Pi_{\varepsilon i}^*$ – значение текущего i -го количественного параметра, например $120/80$; π_j^* – название текущего j -го качественного признака, например *Дрожь в руках*; $\Pi_{\varepsilon j}^*$ – значение текущего j -го качественного признака, например *Нет дрожи*.

Важное требование к информационному описанию о пациенте – это соотношение информационных данных по количеству параметров и признаков: $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, k}$ (рис. 1).

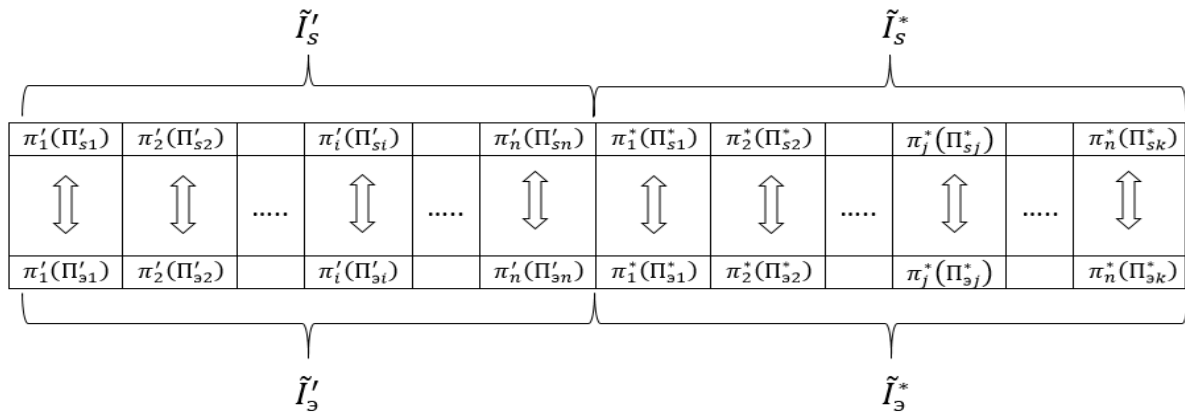


Рис. 1. Соотношение информационных данных о пациенте

Fig. 1. Correlation of patient information data

Для количественной характеристики предлагается использовать функцию нечеткого равенства с заданной точностью $\Delta_{\text{зад}}$ [14; 15; 19]:

$$\mu(\tilde{I}_s, \tilde{I}_\varepsilon) = \min \left(\max \left(1 - \left(\tilde{I}'_s, \tilde{I}'_\varepsilon \right) \right), \max \left(1 - \left(\tilde{I}^*_s, \tilde{I}^*_\varepsilon \right) \right) \right),$$

$$\mu(\tilde{I}_s, \tilde{I}_\varepsilon) \geq \Delta_{\text{зад}}.$$

Результаты и их обсуждение

Для решения этой задачи необходимо:

1. Создать $\tilde{I}_s^u$ – формализованную интегрированную модель состояния здоровья пациента, при этом указав основные параметры и признаки:

$$\tilde{I}_s^u = \{ \pi'_1(\Pi'_{s1}), \pi'_2(\Pi'_{s2}), \dots, \pi'_i(\Pi'_{si}), \dots, \pi'_n(\Pi'_{sn}), \dots, \pi'_j(\Pi'_{sj}), \dots, \pi'_k(\Pi'_{sk}) \},$$

$$\pi^*_1(\Pi^*_{s1}), \pi^*_2(\Pi^*_{s2}), \dots, \pi^*_j(\Pi^*_{sj}), \dots, \pi^*_k(\Pi^*_{sk}) \},$$

$$V(I_s) \subseteq \Omega_s,$$

$$\{ \Omega'_{I_s}, \Omega^*_{I_s} \} \subset \Omega_s,$$

где $V(I_s)$ – имеющийся объем информации о состоянии здоровья пациента; Ω_s – описание параметров состояния здоровья пациента; Ω'_{I_s} – расшифровка параметров о состоянии здоровья пациента по имеющимся результатам средств диагностики; $\Omega^*_{I_s}$ – эмпирическая информация о состоянии здоровья пациента, дополненная качественными признаками врачом.

2. Создать эталонное описание состояния здоровья пациента, его основных количественных параметров и качественных признаков. Для этого стоит

воспользоваться следующими решениями:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{\mathfrak{A}}^u = & \{ \pi'_1(\Pi'_{\mathfrak{A}_1}), \pi'_2(\Pi'_{\mathfrak{A}_2}), \dots, \\ & \pi'_i(\Pi'_{\mathfrak{A}_i}), \dots, \pi'_n(\Pi'_{\mathfrak{A}_n}), \\ & \{ \pi^*_1(\Pi^*_{\mathfrak{A}_1}), \pi^*_2(\Pi^*_{\mathfrak{A}_2}), \dots, \\ & \pi^*_j(\Pi^*_{\mathfrak{A}_j}), \dots, \pi^*_k(\Pi^*_{\mathfrak{A}_k}) \} \end{aligned}$$

3. Создать основные классы диагнозов (классы для возрастных групп, классы для видов заболеваний, территориальной принадлежности проживания человека и т. д.), благодаря которым по текущему состоянию пациента можно с достаточной точностью распознать вид заболевания. Для этого предлагается ис-

пользовать эвристические методы, которые основываются на знаниях, опыте и интуиции разработчика системы принятия решения. В большинстве случаев эти методы ориентированы на решение конкретных типов задач распознавания. Наиболее часто применяются при использовании принципа сравнения с эталоном и принципа общности свойств:

$$\tilde{I}_S^u = \Phi_{\mathfrak{D}}(\tilde{I}_{\mathfrak{A}}^u),$$

где $\Phi_{\mathfrak{D}}$ – алгоритм принятия решения на основе эвристического метода.

Общий вид принятия решения на основе нечёткого логического вывода можно представить схемой (рис. 2).

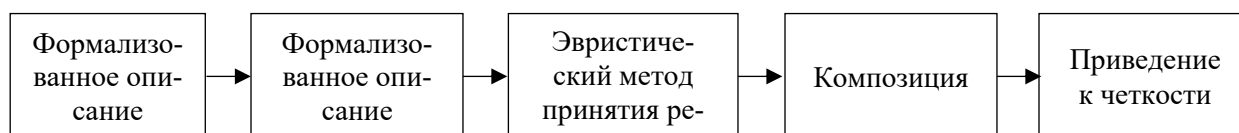


Рис. 2. Общий вид принятия решения [20; 21]

Fig. 2. General view of decision-making [20; 21]

Выводы

Для того чтобы реализовать данный метод, необходимо предусмотреть возможность построения отдельного уточняющего алгоритма при диагностировании заболевания, который будет связан с воспроизведением в форме операций процесса разработки логической структуры при рассуждении экспертом (врачом) в ходе лечения пациента.

Существуют сложности процесса диагностирования, особенно когда они связаны с разными видами нарушений, которые имеют схожие отличия друг от друга, тогда они могут создать проблемы

в применении конкретной выбранной модели, способной грамотно описать все характеристики выбранного метода.

Основная цель диагностирования заболеваний заключается в поиске причин, особенно когда нет достоверной информации, то это приводит к ограничению возможностей использования традиционных способах распознавания причин заболеваний.

Считается, что представленная система может существенно сократить усилия и время врача, потраченное на постановку правильного диагноза, а также повысит качество результатов проведения диагностики.

Список литературы

1. Kanatov M., Atymtayeva L., Yagaliyeva B. Expert systems for Information Security Management and Audit. Implementation phase issues // 2014 Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS). Kitakyushu, Japan: IEEE, 2014.
2. Kononenko W. Machine learning for medical diagnosis: history, state of the art and perspective // *Artif Intell Med*. 2001. N 23(1). P. 89–109.
3. Автоматизированное проектирование информационно-управляющих систем. Проектирование экспертных систем на основе системного моделирования: монография / науч. ред. Г. Г. Куликов. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 1999. 223 с.
4. Евланов Л. Г., Кутузов В. А. Экспертные оценки в управлении. М.: Экономика, 1978. 133 с.
5. Мелихов А. Н., Берштейн Л. С., Коровин С. Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990. 272 с.
6. Сидоркина И. Г. Системы искусственного интеллекта. М.: КНОРУС, 2015. 248 с.
7. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А. Н. Аверкин, И. З. Батыршин, А. Ф. Блишун, В. Б. Силов, В. Б. Тарасов; под ред. Д. А. Поспелова. М.: Наука, 1986. 312 с.
8. Алиев Р. А., Абдикеев Н. М., Шахназаров М. М. Производственные системы с искусственным интеллектом. М.: Радио и связь, 1990. 262 с.
9. Алтунин А. Е., Семухин М. В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: монография. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2000. 352 с.
10. Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. М.: Статистика, 1980. 263 с.
11. Дунин В. О., Егоров В. А. Проблемы создания интеллектуальных средств поиска, анализа и обработки биомедицинской информации // *Инженерный вестник Дона*. 2012. № 4-1(22). С. 24.
12. Модели принятия решений на основе лингвистической переменной / А. Н. Борисов, А. В. Алексеев, О. А. Крумберг [и др.]. Рига: Зинатне, 1982. 256 с.
13. Поддержка принятия решений на основе нечеткой логики в системах медицинского назначения / Е. Н. Долженко, А. Н. Пылькин, А. В. Крошили, С. Ю. Жулева // *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2015. № 7. С. 62–68.
14. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
15. Леоненко А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БВХ – Петербург, 2005. 736 с.

16. Воронина Е. И., Муравей Л. А., Костиков Ю. А. Математико-статистические модели прогнозирования эффективности оперативного лечения некоторых заболеваний // Инженерный вестник Дона. 2013. № 1(24). С. 64.
17. Гельруд Я. Д. Оптимизация развития холдинговой структуры с использованием нечеткой логики // Управление проектами и программами. 2007. № 3. С. 182–190.
18. Душкин Р. В. Методы получения, представления и обработки знаний с НЕ-факторами. М.: Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2011. 115 с.
19. Инжиниринг информационных и деловых процессов: сборник научных трудов / Ю. Ф. Тельнов [и др.]. М.: Московский государственный университет экономики, статистики и информатики, 1998. 137 с.
20. Статические и динамические экспертные системы / Э. В. Попов, И. Б. Фоминых, Е. Б. Кисель, М. Д. Шапот. М.: Финансы и статистика, 1996. 318 с.
21. Россиев Д. А. Нейросетевые самообучающиеся экспертные системы в медицине // Молодые ученые – практическому здравоохранению. Красноярск, 1994. С. 17.

References

1. Kanatov M., Atymtayeva L., Yagaliyeva B. Expert systems for Information Security Management and Audit. Implementation phase issues. 2014 Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS). Kitakyushu, Japan, IEEE Publ., 2014.
2. Kononenko W. Machine learning for medical diagnosis: history, state of the art and perspective. *Artif Intell Med.*, 2001, no. 23(1), pp. 89–109.
3. Computer-aided design of information and control systems. Designing expert systems based on system modeling [Computer-aided design of information and control systems. Designing expert systems based on system modeling]; ed. by G. G. Kulikov. Ufa, Ufa State Aviation Technical University Publ., 1999. 223 p.
4. Evlanov L. G., Kutuzov V. A. *Ekspertnye ocenki v upravlenii* [Expert assessments in management]. Moscow, Ekonomika Publ., 1978. 133 p.
5. Melikhov A. N., Berstein L. S., Korovin S. Ya. *Situacionnye sovetuyushchie sistemy s nechetkoj logikoj* [Situational advising systems with fuzzy logic]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 272 p.
6. Sidorkina I. G. *Sistemy iskusstvennogo intellekta* [Artificial intelligence systems]. Moscow, KNORUS Publ., 2015. 248 p.
7. Averkin A. N., Batyrshin I. Z., Blishun A. F., Silov V. B., Tarasov V. B. *Nechetkie mnozhestva v modelyakh upravleniya i iskusstvennogo intellekta* [Fuzzy sets in control and artificial intelligence models]; ed. by D. A. Pospelova. Moscow, Nauka Publ., 1986. 312 p.
8. Aliev R. A., Abdikeyev N. M., Shakhnazarov M. M. *Proizvodstvennyye sistemy s iskusstvennym intellektom* [Production systems with artificial intelligence]. Moscow, Radio and Communications Publ., 1990. 262 p.

9. Altunin A. E., Semukhin M. V. *Modeli i algoritmy prinyatiya reshenij v nechetkih usloviyah* [Models and algorithms of decision-making in fuzzy conditions]. Tyumen, Tyumen State University Publishing House, 2000. 352 p.
10. Beshelev C. D., Gurvich F. G. *Matematiko-statisticheskie metody ekspertnyh ocenok* [Mathematical and statistical methods of expert assessments]. Moscow, Statistics Publ., 1980. 263 p.
11. Dunin V. O., Egorov V. A. Problemy sozdaniya intellektual'nyh sredstv poiska, analiza i obrabotki biomedicinskoj informacii [Problems of creating intelligent means of searching, analyzing and processing biomedical information]. *Inzhenernyj vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*, 2012, no. 4-1(22), p. 24.
12. Borisov A. N., Alekseev A. V., Krumberg O. A., eds. *Modeli prinyatiya reshenij na osnove lingvisticheskoy peremennoj* [Decision-making models based on a linguistic variable]. Riga, Zinatne Publ., 1982. 256 p.
13. Dolzhenko E. N., Pylkin A. N., Kroshilin A. V., Zhuleva S. Yu. Podderzhka prinyatiya reshenij na osnove nechetkoj logiki v sistemah medicinskogo naznacheniya [Decision support based on fuzzy logic in medical systems]. *Biomedicinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2015, no. 7, pp. 62–68.
14. Zadeh L. A. Ponyatie lingvisticheskoy peremennoj i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennyh reshenij [The concept of a linguistic variable and its application to the adoption of approximate solutions]. Moscow, Mir Publ., 1976. 165 p.
15. Leonenko A. V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH* [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH]. St. Petersburg, BVH – Petersburg Publ., 2005. 736 p.
16. Voronina E. I., Muravey L. A., Kostikov Yu. A. Matematiko-statisticheskie modeli prognozirovaniya effektivnosti operativnogo lecheniya nekotoryh zabolevanij [Mathematical and statistical models for predicting the effectiveness of surgical treatment of certain diseases]. *Inzhenernyj vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*, 2013, no. 1(24), p. 64.
17. Gelrud Ya. D. Optimizaciya razvitiya holdingovoj struktury s ispol'zovaniem nechetkoj logiki [Optimization of the development of the holding structure using fuzzy logic]. *Upravlenie proektami i programmami = Project and Program Management*, 2007, no. 3, pp. 182–190.
18. Dushkin R. V. *Metody polucheniya, predstavleniya i obrabotki znaniy s NE-faktorami* [Methods of obtaining, presenting and processing knowledge with NON-factors]. Moscow, National Research University "MEI" Publ., 2011. 115 p.
19. Telnov Yu. F., eds. *Inzhiniring informacionnyh i delovyh processov. Sbornik nauchnyh trudov* [Engineering of information and business processes. Collection of scientific works]. Moscow, Moscow State University of Economics, Statistics and Informatics Publ., 1998. 137 p.

20. Popov E. V., Fomin I. B., Kisel E. B., Shapot M. D. Statische i dinamicheskie ekspertnye sistemy [Static and dynamic expert systems]. Moscow, Finance and Statistics Publ., 1996. 318 p.

21. Rossiev D. A. Nejrosetevye samoobuchayushchiesya ekspertnye sistemy v medicine [Neural network self-learning expert systems in medicine]. Molodye uchenye – prakticheskomu zdavooohraneniyu [Young scientists – practical healthcare]. Krasnoyarsk, 1994, p. 17.

Информация об авторах / Information about the Authors

Нестерович Сергей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и цифровых технологий, Московский государственный университет технологий и управлений им. К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), г. Москва, Российская Федерация, e-mail: s.nesterovich@mgutm.ru

Sergey A. Nesterovich, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Systems and Digital Technologies, K. G. Razumovsky Moscow State University of Technology and Management (First Cossack University), Moscow, Russian Federation, e-mail: s.nesterovich@mgutm.ru

Брежнева Александра Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: brezhneva.an@rea.ru, ORCID: 0000-0001-5226-329X

Aleksandra N. Brezhneva, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Informatics, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation, e-mail: brezhneva.an@rea.ru, ORCID: 0000-0001-5226-329X

Зырянова Светлана Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и цифровых технологий, Московского государственного университета технологий и управлений им. К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), г. Москва, Российская Федерация, e-mail: s.zyryanova@mgutm.ru

Svetlana A. Zyryanova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Systems and Digital Technologies, K. G. Razumovsky Moscow State University of Technology and Management (First Cossack University), Moscow, Russian Federation, e-mail: s.zyryanova@mgutm.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-31-51>

УДК 004.89:004.93

Интеллектуальная система обеспечения миграции посредством динамической десериализации данных

Р. А. Томакова¹ ✉, Д. В. Иванов¹, Н. А. Корсунский¹

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

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Резюме

Цель исследования заключается в разработке моделей и алгоритмов системы асинхронной десериализации данных, имеющих различные форматы и структуры, для повышения эффективности определения моделей данных за счет генерации строго типизированных объектов.

Методы. Способ десериализации моделей из данных предполагает построчную декомпозицию строки JSON-файла с определением типов «ключ»-«значение» и с их соотношением с моделью данных: символом, строкой, числом, булевым значением. После этого веб-контроллер проводит асинхронную генерацию класса и его объектов. Для классификации значений строк применяются классификаторы значений сериализованной строки. Для асинхронной генерации объектов используется система «контрактов» моделей и алгоритмы исполнения и конвертации данных моделей.

Результаты. Разработан десериализатор данных, который состоит из системы четырех контроллеров анализа моделей и алгоритма генерации значений. Простая модель десериализации одной модели позволяет сопоставить модель с заголовками таблицы реляционной базы данных для обеспечения миграции модели между системами. Генерируемые объекты представляются статическими типами данных, что обеспечивает их запись в любую систему СУБД встроенными средствами. Сложная модель представляет блок значений в виде системы различных моделей. Разработано программное обеспечение для подключения исходных и целевых баз данных, которое позволяет проводить процесс миграции данных из созданных моделей. Генерируемые значения представляются в виде полноценных объектов и могут быть использованы для создания веб-интерфейса приложений с возможностью редактировать модели данных и управлять системой моделей.

Заключение. Экспериментальные исследования по десериализации моделей из JSON-строки, содержащих сложные классы моделей, показали среднее значение точности определения типа данных моделей в 92% случаев, в частности при определении типов значений «символ» и «строка». Созданные модели представляются в виде таблицы данных и могут быть использованы для обеспечения миграции данных моделей.

Ключевые слова: десериализация; СУБД; обмен данными; веб-сервисы; информационная система; базы данных; статическая типизация.

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

Для цитирования: Томакова Р. А., Иванов Д. В., Корсунский Н. А. Интеллектуальная система обеспечения миграции посредством динамической десериализации данных // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 3. С. 31–51. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-31-51>.

Поступила в редакцию 02.07.2023

Подписана в печать 01.08.2023

Опубликована 29.09.2023

Intelligent System for Providing Migration Through Dynamic Data Deserialization

Rimma A. Tomakova¹ ✉, Dmitry V. Ivanov¹, Nikita A. Korsunsky¹

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

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Abstract

The purpose of research. Timely provision of data transfer between information systems allows you to quickly exchange resources. However, applications may have different data formats and structures. Therefore, the aim of the research was to develop models, methods and algorithms for a system of asynchronous deserialization of a data string, providing an increase in the efficiency of determining data models by generating strongly typed objects.

Methods. The way to deserialize models from data involves line-by-line decomposition of a JSON-file line with the definition of key-value types and their correlation with the data model: character, string, number, boolean value. After that, the web controller conducts asynchronous generation of the class and its objects. To classify string values, serialized string value classifiers are used. For asynchronous generation of objects, a system of “contracts” of models and algorithms for executing and converting these models are used.

Results. The deserializer consists of a system of four model analysis controllers and a value generation algorithm. A simple single model deserialization model allows the model to be mapped to relational database table headers to enable model migration between systems. The generated objects are represented by static data types, which ensures that they can be written to any DBMS system using built-in tools. A complex model represents a block of values as a system of different models. Software has been developed for connecting source and target databases, which allows you to migrate data from the created models. Generated values are represented as full-fledged objects and can be used to create a web interface for applications, edit data models, and manage the model system.

Conclusion. Experimental studies on deserialization of models from a JSON string containing complex model classes showed an average accuracy of determining the data type of models in 92% of cases, in particular when determining the types of values “character” and “string”. The created models are presented in the form of a data table and can be used to ensure the migration of these models.

Keywords: deserialization; DBMS; data exchange; web services; information system; databases; static typing.

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

For citation: Tomakova R. A., Ivanov D. V., Korsunsky N. A. Intelligent System for Providing Migration Through Dynamic Data Deserialization. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(3): 31–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-31-51>.

Received 02.07.2023

Accepted 01.08.2023

Published 29.09.2023

Введение

Проблема миграции данных позволяет решить вопрос с хранением, распределением и обработкой информации и является актуальной для большинства организаций, работающих с распределенными системами хранения информации [1]. Использование механизмов удаленной обработки информации в случае распределенных систем хранения данных требует использования различных программ, файлов разных форматов, реляционных баз данных. Подключение к таким распределенным системам с помощью различных драйверов или физическая выгрузка и перенос памяти приводят к большим издержкам во времени, безопасности и даже могут привести к повреждению данных.

В связи с этим возникает необходимость в разработке интеллектуальной системы для обработки входящих данных из формата JSON, их десериализации и интерпретации системой для последующего использования и сохранения в любой директории или базе данных, расположенных в распределенной сети и связанных между собой посредством глобальной сети. Поэтому разработка алгоритмов обеспечения миграций данных, загрузки, сохранения, чтения коллекций данных в интерпретируемые объекты посредством десериализации является актуальной задачей [2; 3].

Интерпретация текстовой строки для работы с файловой системой и объектами позволяет экономить на объеме

данных и скорости их передачи, а возможность асинхронного чтения данных и их преобразования на уровне интеллектуальной системы обеспечения миграции позволит проводить операции над всеми доступными базами данных и директориями, в которых работают сотрудники предприятия. Такой подход является актуальным для многих областей, где требуется оперативная реакция на любые изменения в системе и возможность императивного обновления информации в дочерних системах через центральный узел, в качестве которого и выступает разрабатываемая система динамической десериализации [4].

Своевременное обеспечение миграции данных с формированием интерпретируемых информационной системой структур, обработкой изменений и загрузкой данных через сетевые протоколы является сложной задачей с формированием пар моделей данных и определением типов значений с помощью языка программирования со строгой типизацией. Эта задача связана с процедурами отслеживания изменений в системе и её узлах, обработки больших коллекций данных, сопоставления классов и структур и проведения обмена [5; 6].

В статье был предложен метод десериализации моделей данных, основанный на системе сопоставления контрактов словарей пар типа «ключ:значение» из строки JSON, конвертации строк в массив значений и сопоставления ключевых значений для асинхронной генерации моделей данных.

В настоящее время разработаны разнообразные методы, модели и алгоритмы для решения проблемы генерации объектов и десериализации данных в рабочие структуры [7; 8].

S. Cao, S. Di Girolamo, T. Hoeffler предложили свой метод десериализации моделей данных с помощью переноса на полностью программируемые сетевые адаптеры Smart-NIC и выполнение на пути данных для каждого пакета. Это решение позволяет избежать промежуточных копий памяти, обеспечивая десериализацию «на лету». Они демонстрируем подход, разгружая Google Protocol Buffers, широко используемую платформу для сериализации / десериализации данных. Их оценка говорит о возможности ускорения процесса миграции в 4,8 раза. Затем с помощью моделирования пропускной способности микросервиса они показывают, как можно улучшить общую пропускную способность, организовав десериализацию и фактические действия приложений с помощью PsPIN [9].

A. Bartel, E. Bodden, Y. Le Traon и I. Sayar проводят исследование уязвимости метода десериализации данных напрямую из СУБД. Кроме того, они выявили, что среди исследованных библиотек 37,5% не исправлены, что оставляет гаджеты доступными для кибератак. Выявлено более 104 уязвимости CVE на платформе Java [10; 11].

B. Huang, Y. Tang в своей работе по использованию технологии Protobuf

изучают процесс сериализации информации для хранения данных. Метод змеиного разрыва используется для завершения интервала распределения узлов последовательности, так что рабочее состояние и состояние покоя всегда поддерживают динамический баланс. В соответствии с правилами первого уровня получают данные хранения завершеного целевого узла, анализируют грамматическую структуру и семантику целевых данных. При этом устанавливаются соответствующие соответствия, и информация хранения данных сериализуется. Чтобы проверить эффективность метода сериализации информации для хранения данных Protobuf, разработан сравнительный эксперимент. При использовании трех методов: HDVM, Redis и Protobuf – для сериализации данных JSON сравнительный анализ показывает, что HDVM имеет самое длительное время обработки, а Protobuf – самое короткое время обработки, и целостность данных не затрагивается. Данные моделирования показывают, что метод сериализации Protobuf имеет короткое время преобразования, высокое использование пространства и очевидные преимущества в правильности и целостности. Он подходит для сериализации данных JSON в случае ограниченной пропускной способности [12].

Материалы и методы

Передаваемый и загружаемый в систему пакет данных представляет из

себя коллекцию файлов, часть из которых имеет формат JSON, текстовый файл в виде массива строк. Передаваемый массив построчно и асинхронно разбирается на составные модели: классы, поля классов в виде типов данных и коллекции их значений, а затем создаётся в формате временных значений, с которыми можно работать в рамках интеллектуальной системы или связанных с ней приложений, в т. ч. для чтения и записи значений в базы данных.

Алгоритм передачи моделей данных через веб-сервис

Чтение моделей данных, получаемых информационной системой через веб-сервисы, имеет объектный формат JSON. Благодаря RESTful архитектурному стилю модели приложения, посредством HTTP-протокола реализована возможность передачи объекта в виде строки.

На данном этапе происходит процесс передачи модели данных в управляемое приложение. Используя POST-запрос HTTP-протокола происходит отправка на сервер модели данных одним из способов:

- поточным методом посредством подключения базы данных к информационной системе и выгрузки модели в формате JSON на программном уровне;
- посредством передачи файла формата JSON.

Можно выделить основные преимущества такой модели:

- использование Web-API позволяет взаимодействовать со всеми приложениями, находящимися в распределенной системе сети Интернет;

- можно использовать любые способы проведения миграций данных: консолидацию, распределение и перераспределение между информационными системами;

- позволяет работать с файловыми системами и проводить с их помощью миграции;

- позволяет проводить упрощение сложных моделей данных;

- является одним из наиболее популярных форматов передачи данных и может переводиться в объекты программ без необходимости предварительной записи в таблицы данных;

- поддерживает механизмы автоматизации миграции данных без простоя системы;

- контроллеры поддерживают асинхронные методы, что позволяет проводить миграцию данных без времени простоя.

Такой способ является наиболее эффективным при необходимости организации работы распределенной информационной системы и может быть интегрирован с технологией облачной миграции данных [13; 14].

Процесс миграции данных подразумевает сериализацию или композицию системы объектов в одну единую модель данных. Система объектов представляет из себя неупорядоченное множество пар типа «ключ: значение», взаимодействие с которыми проходит по принципу словаря [15].

Ключ – это название параметра или свойства, который передается интеллектуальной системе.

Модель данных поддерживает передачу различных типов информации. В таблице 1 представлены типы ключей, передаваемые в объекте миграции данных, и их описание.

Таблица 1. Типы ключей данных сериализуемые в модель миграции [16]

Table 1. Types of data keys serialized in the migration model [16]

Тип ключа	Описание
Число	С плавающей точкой двойной точности
Строка	Unicode, содержащей двойные кавычки и обратную косую черту
Логический тип	Истинность / Ложность
Массив	Упорядоченная последовательность однотипных значений
Значение	Все остальные типы значений (var-переменная в языках динамической типизации)
Объект	Набор пар «ключ:значение» неупорядоченного характера
Пробел	—
Nullable-тип	Обозначает пустое значение в паре «ключ:значение»

Модель передачи данных подразумевает проведение миграции данных с сопоставлением общей информационной модели.

Пример реляционной базы данных, загружаемой в информационную систему, представлен ниже (рис. 1).

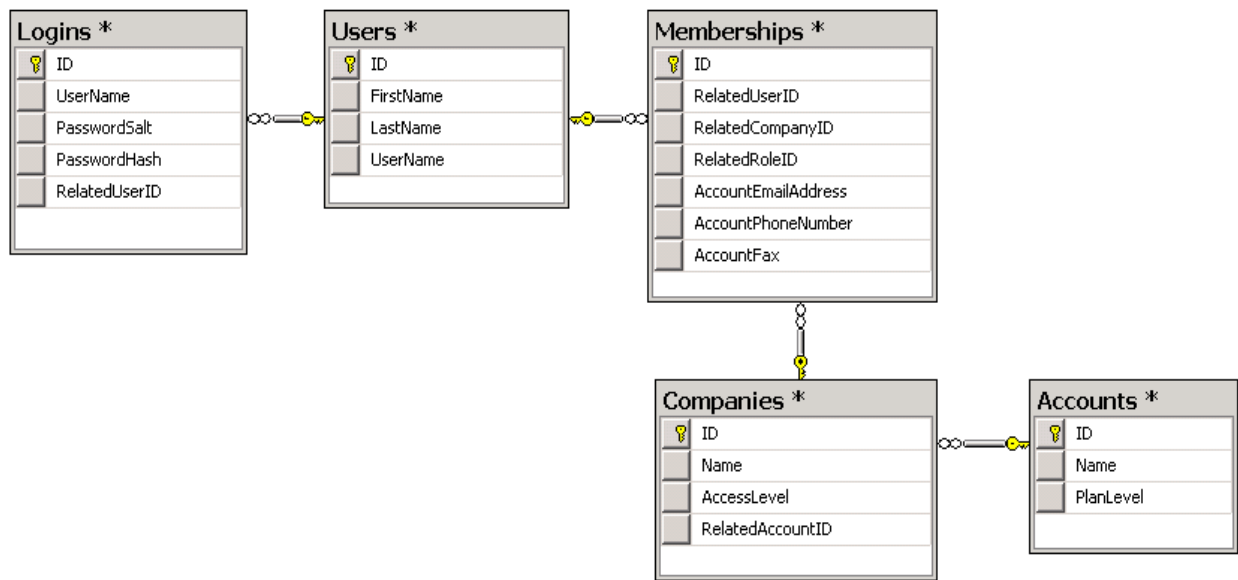


Рис. 1. Пример модели базы данных пользователей

Fig. 1. User Database Model Example

Композиция модели может происходить по нескольким сценариям: пользователь может выгрузить в формат объекта всю базу, одну отдельную или несколько таблиц, отдельные строки. Помимо этого, при желании можно также

загрузить каждую отдельную таблицу в отдельный файл формата JSON с целью структуризации процесса обработки данных.

Рассмотрим пример файла с сериализованной моделью данных (рис. 2).

```
1 {
2   "Logins":{
3     "id":4,
4     "UserName":"test",
5     "PasswordSalt": "test1",
6     "PasswordHash":1,
7     "RelatedUserID":4
8   },
9   "Users":{
10    "ID":4,
11    "FirstName": "testname",
12    "LastName": "testlastname",
13    "UserName": "John"
14  },
15  "Memberships":{
16    "id":4,
17    "RelatedUserID": "test",
18    "RelatedCompanyID": "test1",
19    "RelatedRoleID":1,
20    "AccountEmailAdress":4,
21    "AccountPhoneNumber": "8-941-344-11-24",
22    "AccountFax": null
23  },
24  "Companies":{
25    "Name": "FX1",
26    "AccessLevel": "imp",
27    "RelatedAccountID": 3141
28  },
29  "Accounts":{
30    "ID": 4,
31    "Name": "tes",
32    "PlanLevel":1
33  }
34 }
```

Рис. 2. Пример загружаемой модели данных

Fig. 2. Loadable data model example

Следует отметить, что структура представленного файла состоит из массива строк, каждая из которых представляет из себя определенный тип ключа, в т. ч. тип объекта, внутри которого перечислены свойства [17].

Файл загружается в указанную администратором системы директорию. В

нашем случае будет загружен один файл в главную директорию системы обеспечения миграции. После успешного сохранения файла пользователь будет извещен о результатах. На рисунке 3 изображен результат загрузки файла модели базы данных в систему.

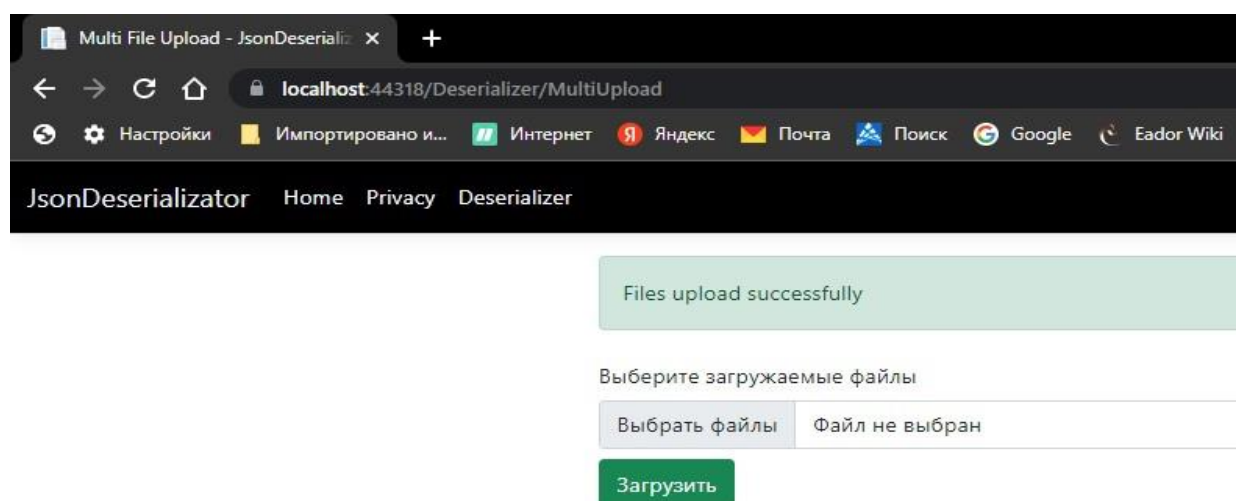


Рис. 3. Результат загрузки файла

Fig. 3. File upload result

Структурные и алгоритмические решения для динамической десериализации модели данных

Модель динамической десериализации данных представляет под собой асинхронное чтение файла и последующую интерпретацию его в систему классов и объектов. В этом процессе применяется генерация динамической структуры данных, которая затем может быть использована в различных приложениях или записана в другую базу данных. Для статического определения полей модели данных следует разработать собственную модель интерпретации: система

должна создавать асинхронно и динамически класс и коллекцию его объектов программным способом [18; 19].

Анализ модели данных, представленной на рисунке 2, свидетельствует о том, что файл указанного формата может быть интерпретирован как массив, состоящий из n -строк. В таком случае, проведя декомпозицию файла с учетом того, что каждая отдельная строка является самостоятельной парой «ключ:значение», за исключением полей с типом ключа «пробел», можно создать коллекцию значений [20].

Следовательно, если организовать построчный вывод модели данных,

можно интерпретировать общую модель данных как массив. Реализуем Get-метод веб-сервиса, в котором файл формата JSON будет считываться системой.

Результат построчного чтения модели данных и его открытия в браузере показан ниже (рис. 4).

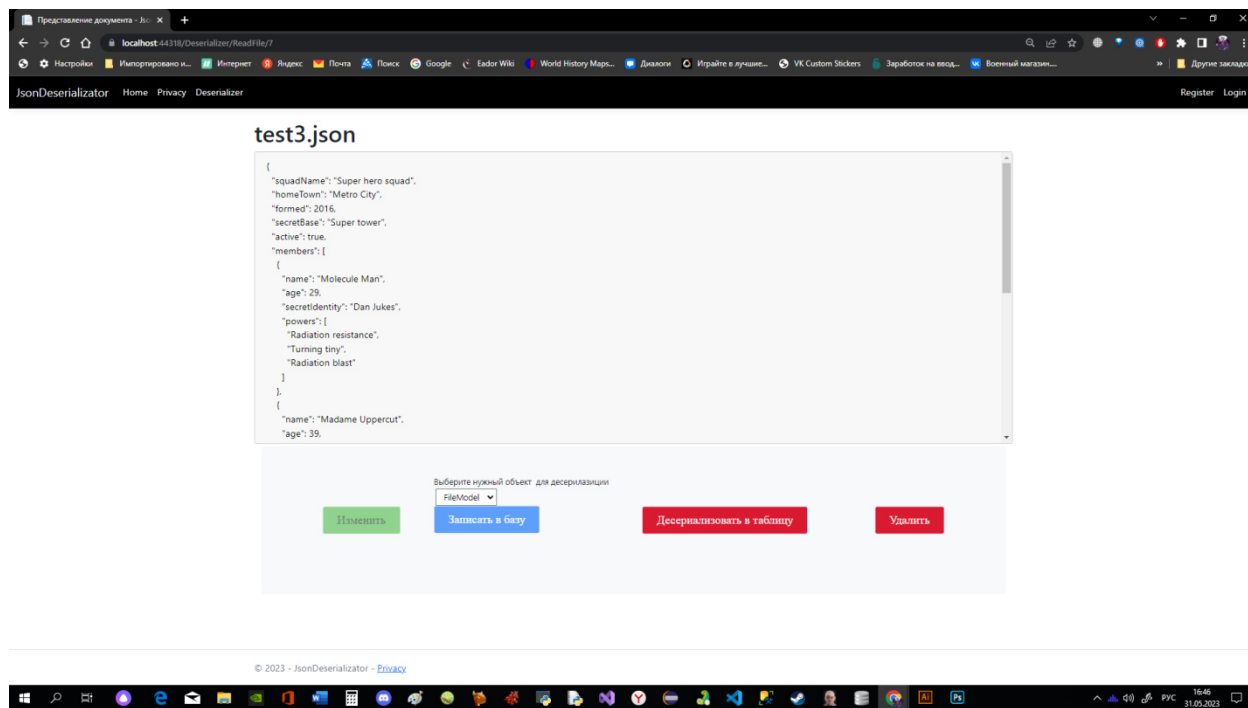


Рис. 4. Результат чтения файла информационной системой

Fig. 4. The result of reading the file by the information system

Однако каждую отдельную строку необходимо интерпретировать из строки в определенное значение выгружаемой модели данных.

Для реализации функции создания динамического объекта нужно ввести понятия существующего значения (Existing Value, EV) и несуществующего значения (Unexisting Value, UV) сериализованной строки. Причем представляемый информационной системой как динамический объект, он позволяет создавать коллекцию значений булевых типов, каждый из которых возвращает в процессе перебора данных вложенное в него значение. Условие принадлежности

строки массива к существующему значению записывается в виде

$$\begin{cases} L_n = EV, \\ L_n \neq UV, \end{cases} \quad (1)$$

где UV является пустой строкой.

Например, если строка имеет тип «Пробел», то система вернёт False – значения не существует, и системой будет пропущено.

В таком случае EV является коллекцией значений, массивом с динамически определяемым размером, каждый элемент которого можно десериализовать в определенное значение.

Для десериализации существующих значений необходимо ввести понятие

функции определения значения (definition value function, DVF). Так, если проверка EV возвращает true, то происходит запись строки потока данных, определяя итоговую коллекцию контрактов при исполнении функции DVF.

Также нужно ввести понятие «исполнитель контрактов» (Contract Resolver, CR), который проводит десериализацию каждого контракта из коллекции. Так свойство (property) контракта с идентификатором порядкового номера коллекции «4» имеет тип «`""active"":true`,».

Нужно ввести понятие функции определения контракта (contract definition function, CDF), которая перебирает значения в коллекции исполнителей контрактов, возвращая поле динамической коллекции свойств. Динамический параметр определяет тип данных: числовой, булевый или текстовый формат. Например, если контракт имеет тип

«`""active"":true`,», то исполнитель контрактов проводит десериализацию значения как Boolean тип данных, передает в параметр название active и его значение true.

CDF представляет из себя массив уникальных значений ключей, встречаемых системой единожды. При повторении типа параметра происходит сопоставление исполнителя контрактов, т. е. значение параметра добавляется в массив объектов, однако ключ-параметр становится общим для всей системы.

Суть процесса определения системы контрактов демонстрирует рисунок 5. Здесь массив объектов с набором одинаковых полей интерпретируется из массива строк, создавая с помощью функции CDF из коллекции исполнителя контрактов CR, которые, в свою очередь, сформированы из массива строк с помощью функции определения значения.

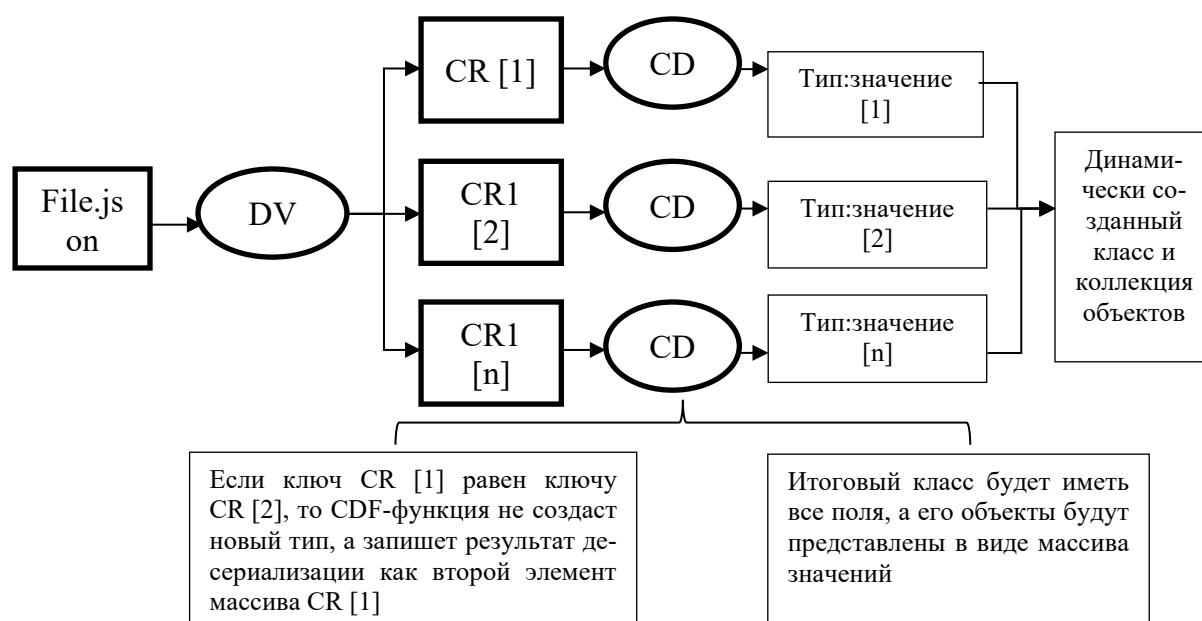


Рис. 5. Концептуальная модель процесса определения системы контрактов функций DVF, CDF

Fig. 5. Conceptual model of the process of defining a system of contracts for functions DVF, CDF

Помимо этого, следует ввести понятие функции автоконвертера параметров (Parameters AutoConverters Function, PACF). PACF принимает в качестве параметра выходное значение функции определения контракта CDF, после чего генерирует итоговый файл в статический класс с набором свойств из исполнителя

контрактов CR, храня значения: идентификатор, название, значение.

Каждый объект внутри передаваемого файла модели данных представляет из себя отдельный сегмент, определенный в фигурных кавычках. На рисунке 6 показана концептуальная модель сегментации файла модели.

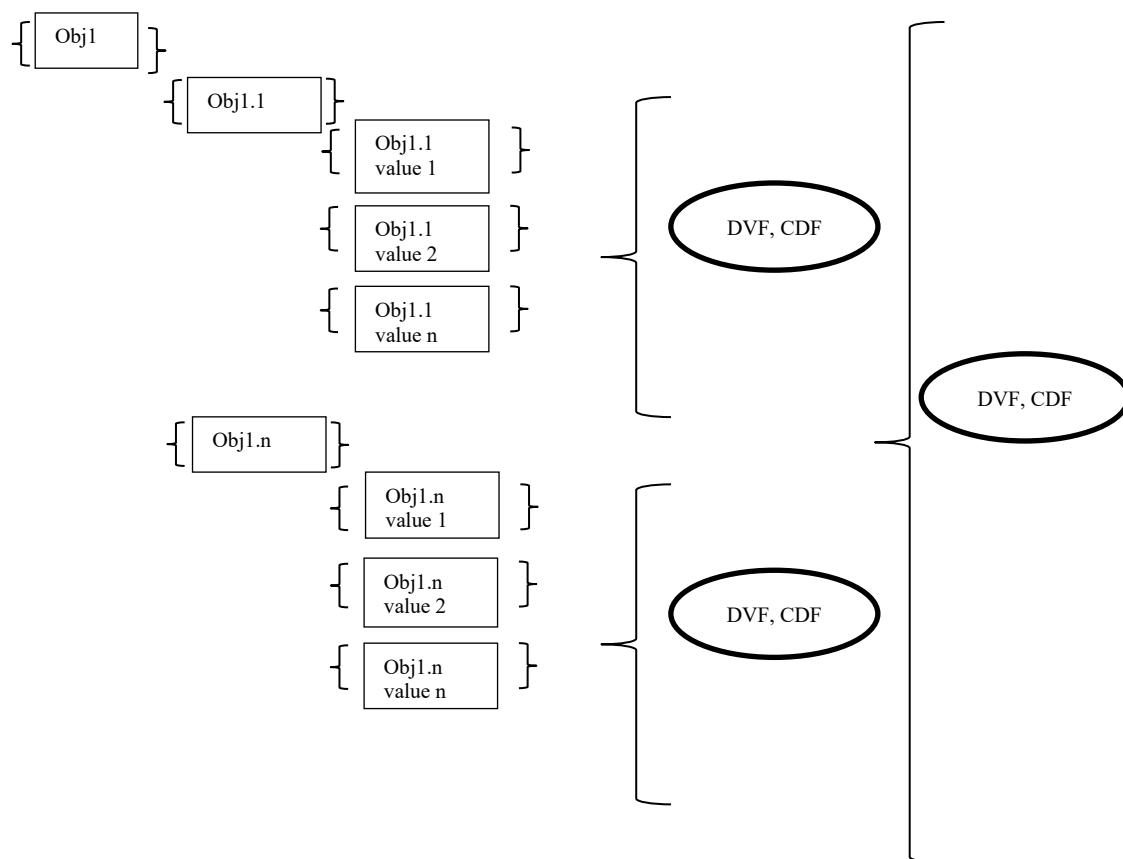


Рис. 6. Концептуальная модель сегментации файла модели

Fig. 6. Conceptual model of model file segmentation

Разработанная информационно-вычислительная система создает динамическую структуру данных, которая представляет из себя конвертированную коллекцию CR исполнителей контрактов, генерирующую с помощью функции автоконвертера параметров свойства воз-

вращаемого динамического объекта, который интерпретируется системой как объект.

Значения этого объекта могут как быть записаны в сопоставляемые таблицы данных (при этом система определения данных позволяет пользователю выбрать, какие значения следует прове-

сти, а какие – удалить) или быть использованными в сторонней программе, подключенной к распределенной системе. Например, если наше приложение принимает данные из исходной СУБД, проводит сериализацию данных и передает их на обработку как объект в целевые системы.

Пусть, например, наше веб-приложение получило файл формата .json, тогда система должна вернуть динамически созданные классы и объекты.

Поскольку структура является динамической и создается при обращении к контроллеру веб-приложения с использованием Get-метода, данные в разрабатываемом методе находятся только в оперативной памяти. Информация о сгенерированной структуре будет удалена при переходе на новую страницу, если проведение миграции данных на текущий момент не требуется. Помимо этого, данный механизм генерации динамического объекта и их записи позволяют передавать параметры в любую существующую СУБД, к которой веб-приложение имеет доступ.

Временная сложность расчета алгоритма десериализации данных DVF функции записывается в виде

$$T_n = O(CR \cdot EV), \quad (2)$$

где T_n – время в мс; O – число объектов внутри модели; CR – число исполнителей контрактов; EV – число существующих значений.

В случае, если все значения в файле имеют данные, то функция является квадратической типа:

$$T_n = O(k^2), \quad (3)$$

поскольку в таком случае $CR = EV$.

Временная сложность вывода данных t в динамический объект классов равняется

$$t = O(m), \quad (4)$$

где m – RACF автоконвертера данных, следовательно, функция является линейной.

Временная сложность заполнения переменных tv генерируемых полей классов значениями равняется

$$tv = O(td), \quad (5)$$

где t – количество полей классов; d – размер массива данных, передаваемых в конкретное значение, являясь результатом перемножения двух линейных алгоритмов.

Следовательно, алгоритм всей десериализации данных O может быть представлен в виде общей линейно-квадратической функции типа

$$O = O_{kf} + O_m + O_{td}, \quad (6)$$

или

$$O = T_n + t + tv. \quad (7)$$

Рассмотрим на примере. На рисунке 7 изображен системный результат десериализации модели данных из рисунка 2 в виде процедурно генерируемой системы классов.

В свою очередь, DVF-функция создает систему классов, которые могут иметь коллекцию значений в виде объектов. На рисунке 8 изображены генерируемые CDF-функцией объекты, наследуемые от классов из рисунка 7.

```

2   public class Accounts
3   {
4       public int ID { get; set; }
5       public string Name { get; set; }
6       public int PlanLevel { get; set; }
7   }
8
9   public class Companies
10  {
11      public string Name { get; set; }
12      public string AccessLevel { get; set; }
13      public int RelatedAccountID { get; set; }
14  }
15
16  public class Logins
17  {
18      public int id { get; set; }
19      public string UserName { get; set; }
20      public string PasswordSalt { get; set; }
21      public int PasswordHash { get; set; }
22      public int RelatedUserID { get; set; }
23  }
24  "8-941-344-11-24",
141
25  public class Memberships
26  {
27      public int id { get; set; }
28      public string RelatedUserID { get; set; }
29      public string RelatedCompanyID { get; set; }
30      public int RelatedRoleID { get; set; }
31      public int AccountEmailAdress { get; set; }
32      public string AccountPhoneNumber { get; set; }
33      public object AccountFax { get; set; }
34  }
35
36  public class Root
37  {
38      public Logins Logins { get; set; }
39      public Users Users { get; set; }
40      public Memberships Memberships { get; set; }
41      public Companies Companies { get; set; }
42      public Accounts Accounts { get; set; }
43  }
44
45  public class Users
46  {
47      public int ID { get; set; }
48      public string FirstName { get; set; }
49      public string LastName { get; set; }
50      public string UserName { get; set; }
51  }

```

Рис. 7. Результат работы системы в виде генерируемого значения классов

Fig. 7. The result of the system operation in the form of a generated class value

```

1  Accounts accounts = new Accounts() {
2  ID = 4,
3  Name = "tes",
4  PlanLevel = 1,
5  };
6
7  Companies companies = new Companies() {
8  Name = "FX1",
9  AccessLevel = "imp",
10 RelatedAccountID = 3141,
11 };
12
13 Logins logins = new Logins() {
14 id = 4,
15 UserName = "test",
16 PasswordSalt = "test1",
17 PasswordHash = 1,
18 RelatedUserID = 4,
19 };
20
21 Memberships memberships = new Memberships() {
22 id = 4,
23 RelatedUserID = "test",
24 RelatedCompanyID = "test1",
25 RelatedRoleID = 1,
26 AccountEmailAdress = 4,
27 AccountPhoneNumber = "8-491-344-11-24",
28 AccountFax = null
29 };
34  UserName = "",
35  PasswordSalt = "",
36  PasswordHash = 1,
37  RelatedUserID = 1,
38  },
39  Users = new Users(){
40  ID = 1,
41  FirstName = "",
42  LastName = "",
43  UserName = "",
44  },
45  Memberships = new Memberships(){
46  id = 1,
47  RelatedUserID = "",
48  RelatedCompanyID = "",
49  RelatedRoleID = 1,
50  AccountEmailAdress = 1,
51  AccountPhoneNumber = "",
52  // Unknown Property : AccountFax
53  },
54  Companies = new Companies(){
55  Name = "",
56  AccessLevel = "",
57  RelatedAccountID = 1,
58  },
59  Accounts = new Accounts(){
60  ID = 1,
61  Name = "",
62  PlanLevel = 1,
63  },
64  };

```

Рис. 8. Результат работы системы в виде генерируемых коллекций объектов

Fig. 8. The result of the system operation in the form of generated collections of objects

На рисунке 9 представлена схема
модифицированного алгоритма десериа-

лизации данных с помощью алгоритма
генерации динамических объектов.

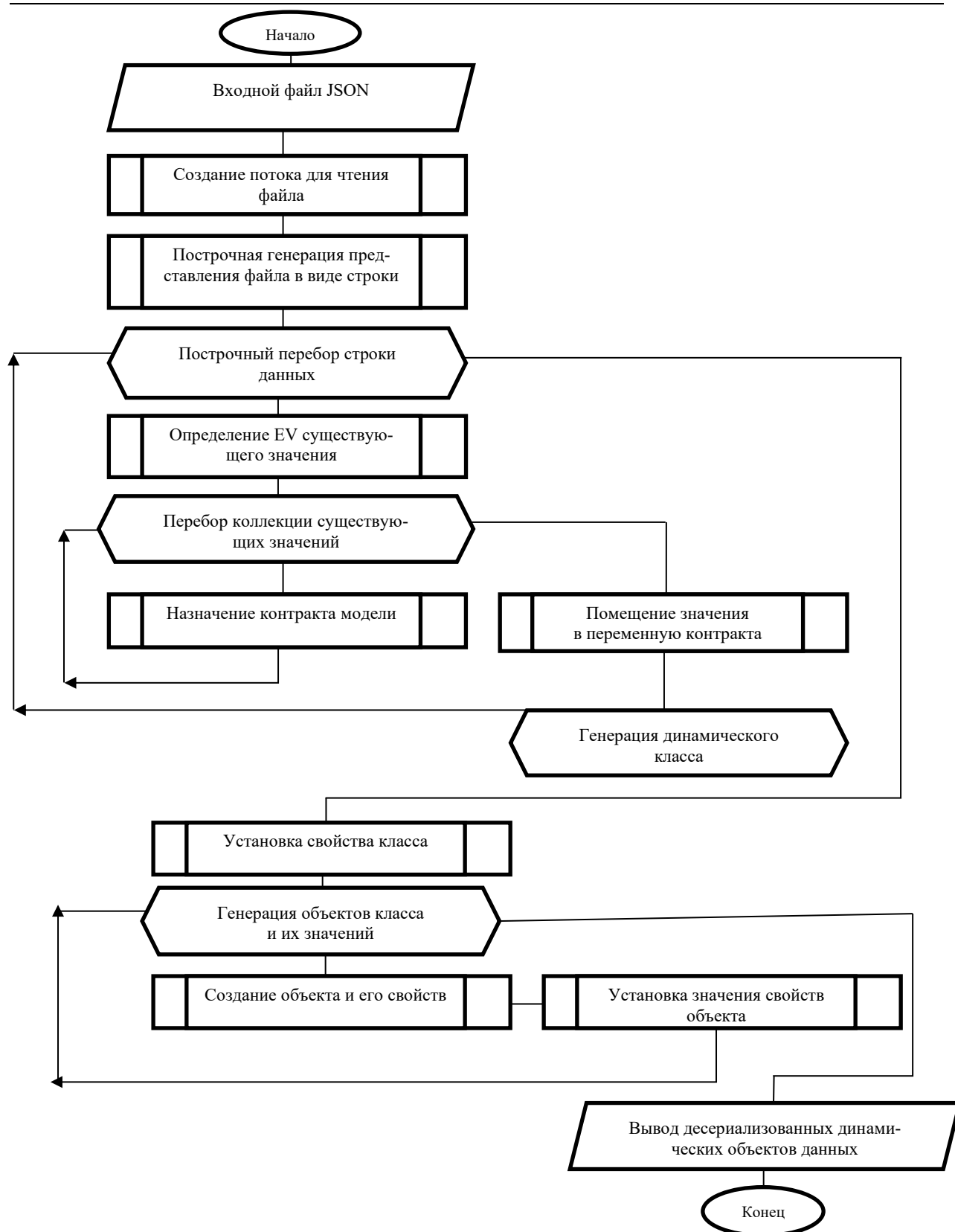


Рис. 9. Схема модифицированного алгоритма десериализации данных на основе генерации динамических объектов

Fig. 9. Scheme of the modified data deserialization algorithm based on the generation of dynamic objects

После выполнения процесса десериализации пакетов данных создается система объектов и классов, которая может быть интерпретирована системой сразу (например, визуально быть представлена в виде таблицы или системы объектов), а также быть записана в любую реляционную базу данных.

Результаты и их обсуждение

Для оптимизации работы десериализатора моделей данных было разработано веб-приложение обеспечения миграции данных. На рисунке 10 изображено интерфейсное окно главного меню программного обеспечения. Приложение поддерживает аутентификацию и авторизацию пользователей.

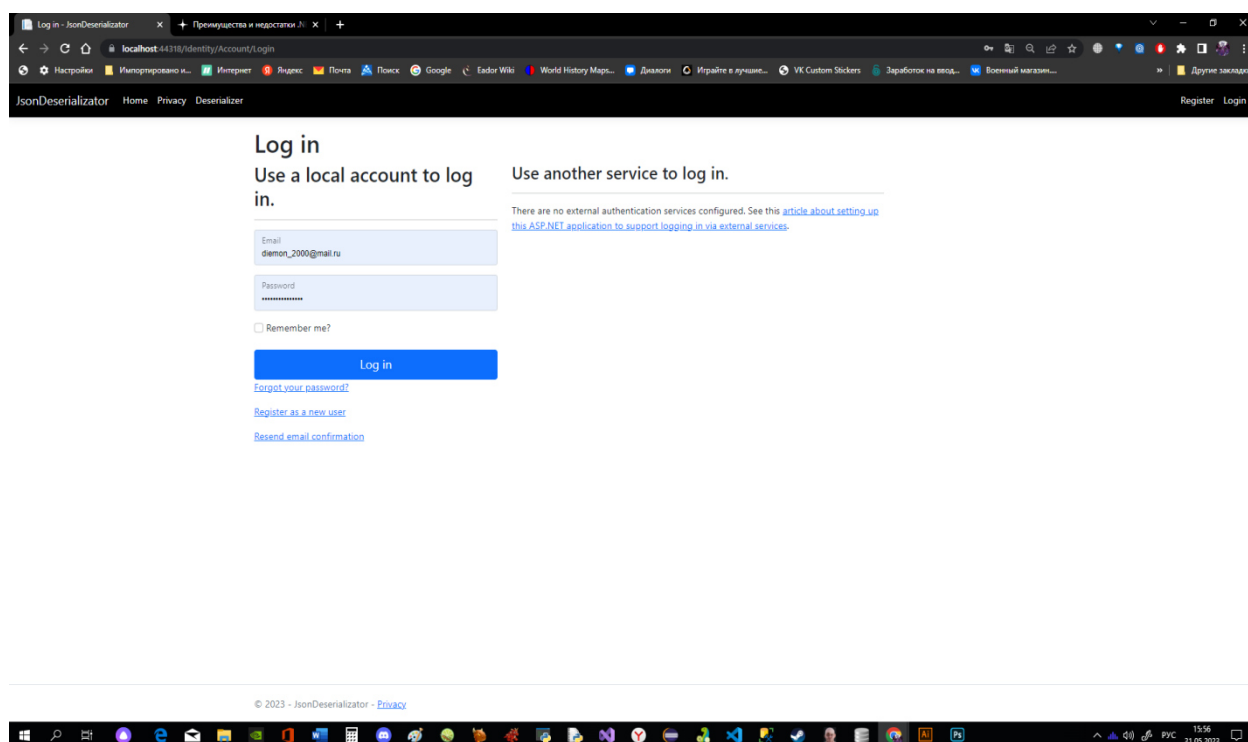


Рис. 10. Интерфейсное окно главного меню программного обеспечения

Fig. 10. Interface window of the main menu of the software

Главное меню включает систему ссылок, с помощью контроллеров реализована маршрутизация по сайту с помощью MVC-модели. Модуль Home отправляет пользователя в главное меню сайта.

Модуль Deserializer предоставляет пользователю доступ к директории, указанной администратором или выбранной им из предоставленных. На рисунке 11

изображено окно представления директории сервера.

На рисунке 3 был показан процесс загрузки файлов. В этот раздел можно перейти из меню раздела Deserialize.

Открытие файла работает по модели адресации с системой id. Переходя по нужной ссылке, происходит асинхронное открытие документа с возможностью его чтения и изменения.

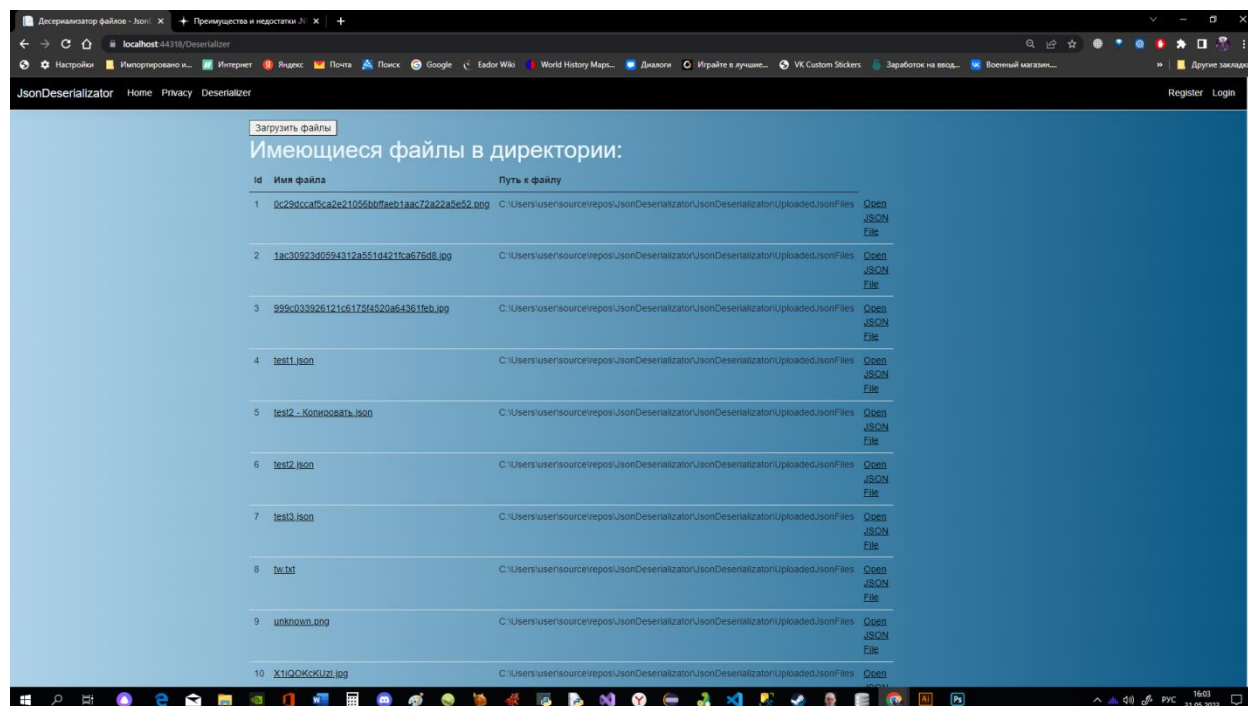


Рис. 11. Окно раздела Deserializer

Fig. 11. Deserializer section window

При нажатии на кнопку «Десериализовать в таблицу» со стороны сервера происходит применение механизма разбора строки в однотипные объекты на языке C#, представленные на клиенте. Кнопка «Записать в базу» становится

активной и позволяет сохранить данные, сопоставленные с моделью (список которых загружается из базы данных). На рисунке 12 изображен результат десериализации и создания объекта из файла test3.json.

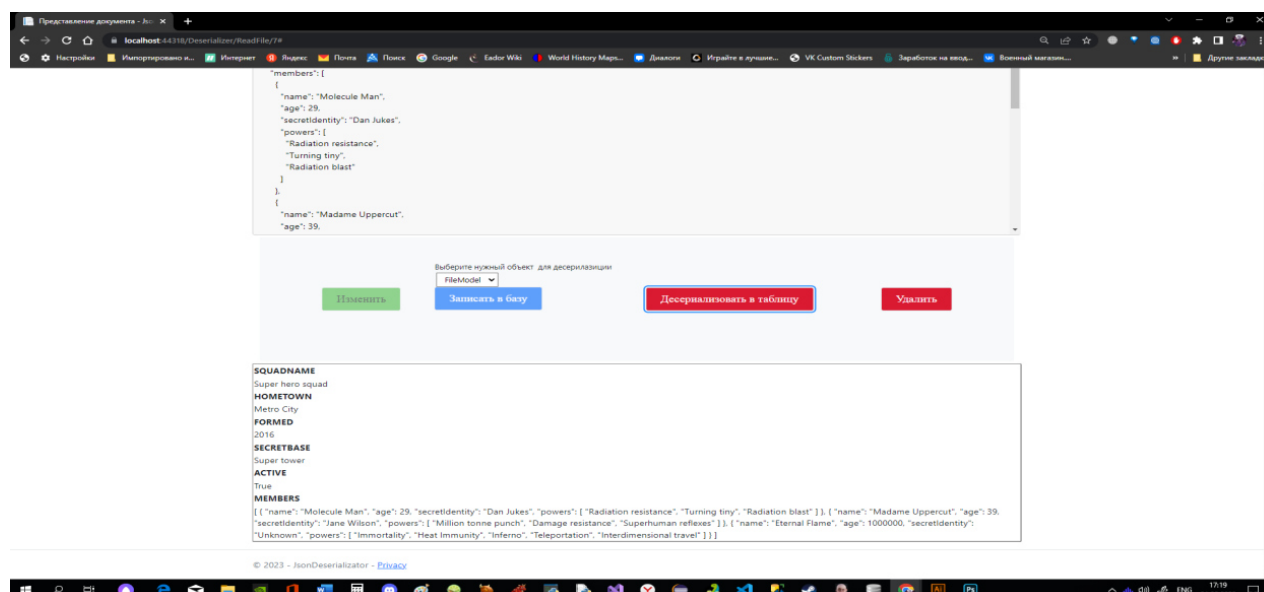


Рис.12. Результат десериализации файла test3.json

Fig. 12. The result of the deserialization of the file test3.json

Модель данных может быть загружена в базу данных при условии сопоставления всех полей объекта. В случае, если таблицы на текущий момент не существует, система с помощью Entity Framework создает новую таблицу и заполняет её значениями.

Выводы

1. Разработан метод динамической десериализации моделей данных. Десериализатор состоит из системы четырех контроллеров анализа моделей и алгоритма генерации значений. Простая модель десериализации одной модели позволяет сопоставить модель с заголовками таблицы реляционной базы данных для обеспечения миграции модели между системами. Генерируемые объекты представляются статическими типами данных, что обеспечивает их запись в любую систему СУБД встроенными средствами. Сложная модель представляет блок значений в виде системы различных моделей. Разработано программное обеспечение для подключения исходных и целевых баз данных, которое позволяет проводить миграции

данных из созданных моделей. Генерируемые значения представляются в виде полноценных объектов и могут быть использованы для создания веб-интерфейса приложений, редактировать модели данных и управлять системой моделей.

С помощью разработанных алгоритмов функции автоконвертации PACF и её методов DVF, CDF происходит асинхронная генерация словарей с парами «ключ-значение», сопоставление ключей и валидация загружаемой модели данных.

2. Установлены критерии качества в виде скорости десериализации модели данных и точности определения модели. Экспериментальные исследования по десериализации моделей из JSON-строки, содержащих сложные классы моделей, показали среднее значение точности определения типа данных моделей в 92% случаев, в частности, при определении типов значений «символ» и «строка». Созданные модели представляются в виде таблицы данных и могут быть использованы для обеспечения миграции данных моделей.

Список литературы

1. Метод классификации рентгенограмм на основе использования глобальной информации об их структуре / Р. А. Томакова, М. В. Томаков, И. В. Дураков, В. В. Жилин // Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. № 9. С. 45–51.
2. Нейронные сети с макрослоями для классификации и прогнозирования патологий сетчатки глаза / Н. А. Корневский, Р. А. Томакова, С. П. Серегин, А. Ф. Рыбочкин // Медицинская техника. 2013. № 4 (280). С. 16–18.
3. Нейросетевые модели сегментации ангиограмм глазного дна на основе анализа RGB-кодов пикселей / А. Н. Брежнева, С. А. Борисовский, Р. А. Томакова, С. А. Филист // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2010. Т. 9, № 1. С. 72–76.

4. Многослойные морфологические операторы для сегментации сложноструктурируемых растровых полутоновых изображений / С. А. Филист, А. Р. Дабагов, Р. А. Томакова, И. А. Малютина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 3 (32). С. 44–63.
5. Tomakova R. A., Filist S. A., Pykhtin A. I. Automatic Fluorography Segmentation Method Based on Histogram of Brightness Submission in sliding Window // International Journal of Pharmacy and Technology. 2017. Vol. 9, N 1. P. 28220–28228.
6. Томакова Р. А., Шевцов А. Н. Способ построения телекоммуникационной сети передачи данных с борта воздушного судна на наземный диспетчерский пункт // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 157–173.
7. Shiyi Cao, Salvatore Di Girolamo, Torsten Hoefler. Accelerating Data Serialization / Deserialization Protocols with In-Network Compute // Workshop on Exascale MPI (ExaMPI) Dallas, TX, USA: IEEE, 2023. P. 12–19.
8. Sayar Imen, Bartel Alexandre, Bodden Eric, Le Traon Yves. An In-depth Study of Java Deserialization Remote-Code Execution Exploits and Vulnerabilities // ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. 2023. N 1-31. <https://doi.org/10.1145/3554732>.
9. Juan Antonio Mora-Castillo. Object serialization/deserialization and data transmission with JSON // Revista Tecnología en Marcha. 2016. Vol. 29, is. 1. P. 118–125. <https://doi.org/10.18845/tm.v29il.2544>.
10. Huang B., Tang Y. Research on optimization of real-time efficient storage algorithm in data information serialization // PLoS One. 2021. N 16(12). P. e0260697. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260697>.
11. Software Architecture: 15th European Conference, ECSA 2021 / ed. by S. Biffl, E. Navarro, W. Löwe, M. Sirjani, R. Mirandola, D. Weyns. Sweden: Virtual Event, 2021. 339 p.
12. Борисовский С. А., Брежнева А. Н., Томакова Р. А. Нейросетевые модели с иерархическим пространством информативных признаков для сегментации плоскоструктурированных изображений // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. № 2. С. 49–53.
13. Фримен Э., Робсон Э., Сьерра К. Паттерны проектирования. СПб.: Питер, 2011. С. 203–229.
14. Мартин Р. Принципы, шаблоны и методы гибкой разработки на C#. СПб.: Питер, 2019. С. 39–49.
15. Varanasi B., Bartkov M. Spring REST. Building Java Microservices and Cloud Applications. Apress Berkeley, CA, 2022. 243 p.

16. Sarshfield S. Data Migration Best Practices: Strategies for Successful Data Migration Between Applications. Kindle, 2018. 169 p.
17. Ньюмен С. Создание микросервисов. СПб.: Питер, 2016. 304 с.
18. Software Architecture for Big Data and the Cloud / I. Mistrik, R. Bahsoon, N. Ali, M. Heisel, B. Maxim. Elsevier Science, 2017.
19. Morris J. Data Migration Handbook: Practical Advice for Data Migration Projects. London: BCS The Chartered Institute for IT, 2020. P. 231–244.
20. Дулан Д. Миграция данных: практическое руководство по эффективному переносу данных. Wembleton, London: BCS Learning & Development Ltd, 2020. P. 301–312.

References

1. Tomakova R. A., Tomakov M. V., Durakov I. V., Zhilin V. V. Metod klassifikacii rentgenogramm na osnove ispol'zovaniya global'noj informacii ob ih strukture [Method of classification of radiographs based on the use of global information about their structure]. *Biomedicinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2016, no. 9, pp. 45–51.
2. Korenevsky N. A., Tomakova R. A., Seregin S. P., Rybochkin A. F. Nejronnye seti s makrosloyami dlya klassifikacii i prognozirovaniya patologij setchatki glaza [Neural networks with macro layers for classification and prediction of retinal pathologies]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2013, no. 4 (280), pp. 16–18.
3. Brezhneva A. N., Borisovsky S. A., Tomakova R. A., Filist S. A. Nejrosetevye modeli segmentacii angiogramm glaznogo dna na osnove analiza RGB-kodov pikselej [Neural network models of segmentation of fundus angiograms based on the analysis of RGB pixel codes]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2010, vol. 9, no. 1, pp. 72–76.
4. Filist S. A., Dabagov A. R., Tomakova R. A., Malyutina I. A. Mnogoslojnye morfoloicheskie operatory dlya segmentacii slozhnostrukturiruemih rastrovih polutonojnih izobrazhenij [Multilayer morphological operators for segmentation of complex structured raster half-tone images]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, vol. 9, no. 3 (32), pp. 44–63.
5. Tomakova R. A., Filist S. A., Pykhtin A. I. Automatic Fluorography Segmentation Method Based on Histogram of Brightness Submission in sliding Window. *International Journal of Pharmacy and Technology*, 2017, vol. 9, no 1, pp. 28220–28228.
6. Tomakova R. A., Shevtsov A. N. Sposob postroeniya telekommunikacionnoj seti peredachi dannyh s borta vozdushnogo sudna na nazemnyj dispetcherskij punkt [Method of building a telecommunication data transmission network from an aircraft to a ground control

room]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 157–173.

7. Shiyi Cao, Salvatore Di Girolamo, Torsten Hoefler. Accelerating Data Serialization / Deserialization Protocols with In-Network Compute. Workshop on Exascale MPI (ExaMPI). Dallas, TX, USA, IEEE Publ., 2023, pp. 12–19.

8. Sayar Imen, Bartel Alexandre, Bodden Eric, Le Traon Yves. An In-depth Study of Java Deserialization Remote-Code Execution Exploits and Vulnerabilities. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, 2023, no. 1-31. <https://doi.org/10.1145/3554732>

9. Juan Antonio Mora-Castillo. Object serialization/deserialization and data transmission with JSON. *Revista Tecnología en Marcha*, 2016, vol. 29, is. 1, pp. 118–125. <https://doi.org/10.18845/tm.v29il.2544>

10. Huang B., Tang Y. Research on optimization of real-time efficient storage algorithm in data information serialization. *PLoS One*, 2021, no. 16(12), p. e0260697. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260697>

11. Software Architecture: 15th European Conference, ECSA 2021; ed. by S. Biffl, E. Navarro, W. Löwe, M. Sirjani, R. Mirandola, D. Weyns. Sweden, Virtual Event Publ., 2021. 339 p.

12. Borisovsky S. A., Brezhneva A. N., Tomakova R. A. Nejrosetevye modeli s ierarhicheskim prostranstvom informativnykh priznakov dlya segmentacii plohostrukturirovannykh izobrazhenij [Neural network models with a hierarchical space of informative features for segmentation of poorly structured images]. *Biomeditsinskaya radioelektronika* = *Biomedical Radioelectronics*, 2010, no. 2, pp. 49–53.

13. Freeman E., Robson E., Sierra K. Patterny proektirovaniya [Design patterns]. St. Petersburg, Peter Publ., 2011, pp. 203–229.

14. Martin R. Principy, shablony i metody gibkoj razrabotki na C # [Principles, patterns and methods of agile development in C#]. St. Petersburg, Peter Publ., 2019, pp. 39–49.

15. Varanasi B., Bartkov M. Spring REST. Building Java Microservices and Cloud Applications. Apress Berkeley, CA, 2022. 243 p.

16. Sarshfield S. Data Migration Best Practices: Strategies for Successful Data Migration Between Applications. Kindle, 2018. 169 p.

17. Newman S. Sozdanie mikroservisov [Creation of microservices]. St. Petersburg, Peter Publ., 2016. 304 p.

18. Mistrik I., Bahsoon R., Ali N., Heisel M., Maxim B. Software Architecture for Big Data and the Cloud. Elsevier Science, 2017.

19. Morris J. Data Migration Handbook: Practical Advice for Data Migration Projects. London, BCS The Chartered Institute for IT Publ., 2020, pp. 231–244.

20. Doolan D. Migraciya dannyh: prakticheskoe rukovodstvo po effektivnomu perenosu dannyh [Data Migration: A Practical Guide to Effective Data Migration]. Wimbledon, London, BCS Learning & Development Ltd Publ., 2020, pp. 301–312.

Информация об авторах / Information about the Authors

Томакова Римма Александровна,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры программной инженерии,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: rtomakova@mail.ru,
Researcher ID: O-6164-2015,
ORCID: 0000-0003-152-4714

Rimma A. Tomakova, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Professor of the Department
of Software Engineering, Southwest State
University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: rtomakova@mail.ru,
Researcher ID: O-6164-2015,
ORCID: 0000-0003-152-4714

Иванов Дмитрий Вадимович, магистрант,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: asmadisel@yandex.ru,
ORCID: 0009-0004-5581-1641

Dmitry I. Vadimovich, Undergraduate,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: asmadisel@yandex.ru,
ORCID: 0009-0004-5581-1641

Корсунский Никита Александрович,
аспирант, Юго-Западный государственный
университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: cor.nick2013@yandex.ru,
ORCID: 0009-0005-4606-5517

Nikita A. Korsunsky, Post-Graduate Student,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: cor.nick2013@yandex.ru,
ORCID: 0009-0005-4606-5517

Двухэтапная математическая модель оценки режимов вынужденных вибраций элемента обшивки летательного аппарата с применением оптоволоконных технологий

И. И. Сизонов¹ ✉, А. С. Барабушка², И. Е. Мухин¹

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

² Национальный центр вертолетостроения имени М. Л. Миля и Н. И. Камова
ул. Гаршина, д. 26/1, Московская область, Томилино 140070, Российская Федерация

✉ e-mail: Ivan.sizonov2017@yandex.ru

Резюме

Цель исследования – разработка математической модели вибрационных колебаний элемента обшивки летательного аппарата, выполненного в форме пластины, с двухэтапным преобразованием «параметры вибрационной нагрузки – деформация пластины – изменение длины волны оптического сигнала» для осуществления учёта количества циклов нагружения и их характеристик, накопленной усталостной деформации пластины и её ресурса до наступления критического состояния с целью оптимизации плановых ремонтов и снижения рисков непрогнозируемых отказов, связанных с усталостными явлениями в материале обшивки и несущих конструкциях летательного аппарата.

Методы. Для описания математической модели в качестве входных данных используются параметры вибрационного сигнала гармонического характера. Рассматривается двухэтапное преобразование: во-первых, параметров вибрационного сигнала (частота, амплитуда) в амплитуду вибрационных колебаний элемента обшивки летательного аппарата, выполненного в форме пластины; во-вторых, амплитуды колебаний рассматриваемой пластины в изменение длины волны оптического сигнала, наличие которого обуславливается применением оптоволоконных технологий, перспективных для построения современных систем контроля и диагностики летательных аппаратов.

Результаты. Предложенная математическая модель позволяет расчетно-аналитическими методами произвести оценку амплитуды вынужденных вибрационных колебаний элемента обшивки летательного аппарата, обуславливающей отсутствие расхода ресурса пластины ввиду воздействия циклов нагружения (имеет место только естественное старение материала), расход ресурса пластины в режиме упругой деформации, накопление усталостной деформации образца. Результирующая деформация пластины выражается в изменении длины волны светового луча для детектирования и анализа системой контроля и диагностики летательного аппарата, выполненной на базе оптоволоконных технологий.

Заключение. Предложенная математическая модель предназначена для осуществления оценки остаточного ресурса конкретного элемента обшивки летательного аппарата, предполагает последующее программное моделирование для подтверждения корректности или уточнения полученного алгоритма расчёта.

Ключевые слова: система контроля и диагностики; вибрация; элемент обшивки; летательный аппарат; коэффициент нарастания колебаний; резонанс; остаточный ресурс; оптоволокно; решетка Брэгга.

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

Для цитирования: Сизонов И. И., Барабушка А. С., Мухин И. Е. Двухэтапная математическая модель оценки режимов вынужденных вибраций элемента обшивки летательного аппарата с применением оптоволоконных технологий // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 3. С. 52–63. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-52-63>.

Поступила в редакцию 18.07.2023

Подписана в печать 15.08.2023

Опубликована 29.09.2023

A Two-Stage Mathematical Model for Evaluating the Modes of Forced Vibrations of an Aircraft Skin Element with the Use of Fiber-Optic Technologies

Ivan I. Sizonov¹ ✉, Alexander S. Barabushka², Ivan E. Mukhin¹

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

² National Helicopter Center Mil and Kamov
26/1 Garshina Str., Moscow Region, Tomilino 140070, Russian Federation

✉ e-mail: Ivan.sizonov2017@yandex.ru

Abstract

The purpose of research is development of a mathematical model of vibration vibrations of an aircraft skin element made in the form of a plate with a two-stage transformation "vibration load parameters – deformation of the plate - change in the wavelength of the optical signal" in order to take into account the number of loading cycles and their characteristics, accumulated fatigue deformation of the plate and its life before the critical state in order to optimize planned repairs and reducing the risks of unpredictable failures associated with fatigue phenomena in the skin material and supporting structures of the aircraft.

Methods. The described mathematical model uses the parameters of a harmonic vibration signal as input data and includes a two-stage transformation, firstly, of the parameters of the vibration signal (frequency, amplitude) into the amplitude of the vibration vibrations of the aircraft skin element made in the form of a plate, secondly, the amplitude of the vibrations of the plate in question into a change in the wavelength of the optical signal, the presence of which is caused by the use of fiber-optic technologies that are promising for the construction of modern systems for monitoring and diagnostics of aircraft.

Results. The proposed mathematical model allows calculating and analytical methods to estimate the amplitude of forced vibration vibrations of the aircraft skin element, which causes the absence of plate resource consumption due to the effects of loading cycles (there is only natural aging of the material), plate resource consumption in elastic deformation mode, accumulation of fatigue deformation of the sample. The method of evaluating the plate for the resonant effect is given, which indirectly affects the processes of designing the elements of the aircraft skin in terms of weight and size indicators, which largely determine the frequency of natural vibrations of the plate. The resulting deformation of the plate is expressed in a change in the wavelength of the light beam for detection and analysis by the control and diagnostic system of the aircraft, made on the basis of fiber-optic technologies.

Conclusion. The proposed mathematical model is designed to assess the residual life of a specific element of the aircraft skin, involves subsequent software modeling to confirm the correctness or refinement of the resulting calculation algorithm.

Keywords: monitoring and diagnostics system; vibration; skin element; aircraft; oscillation increase coefficient; resonance; residual resource; optical fiber; Bragg grid.

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

For citation: Sizonov I. I., Barabushka A. S., Mukhin I. E. A Two-Stage Mathematical Model for Evaluating the Modes of Forced Vibrations of an Aircraft Skin Element with the Use of Fiber-Optic Technologies. *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*. 2023; 13(3): 52–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-52-63>.

Received 18.07.2023

Accepted 15.08.2023

Published 29.09.2023

Введение

Стремительное развитие летательных аппаратов (далее – ЛА) гражданского и военного назначения, начавшееся еще с середины прошлого столетия, с одной стороны, подкреплено необходимостью контроля устаревающего парка отечественных ЛА, с другой – требует наличия адекватных и достаточно надежных средств контроля технического состояния ЛА, сопоставимых по сложности с конструкцией самого ЛА [1; 2; 3]. Современные реалии отечественной авиационной промышленности, вынужденной экстренно импортозамещать не только зарубежные изделия целиком, но и бороться с импортной компонентной базой в составе, на первый взгляд отечественных изделий, лишь усугубляет потребность в качественных системах контроля и диагностики ЛА (далее – СКД ЛА).

Современные СКД ЛА имеют существенный разброс не только по глубине контроля, зачастую либо недостаточной, либо избыточной для осуществления контроля с заданной точностью [4], но и базируются на различных технологиях, что обуславливает разброс контролируемых величин и погрешность их регистрации.

Целью данной работы является разработка математической модели, связующей параметры вибрации гармонического характера, действующей на элемент конструкции (обшивки) ЛА, и параметры некоего выходного сигнала (электрического, оптического, акустического и т. п.), удобного для регистрации и учёта.

Решаемыми задачами являются:

1. Задача выбора технологии для реализации СКД ЛА.
2. Задача выбора промежуточного элемента (элементов) математической модели для преобразования параметров входной вибрации в параметры выходного сигнала.
3. Определение физического характера выходного сигнала.

Материалы и методы

Одной из перспективных технологий, обеспечивающей контроль технического состояния ЛА, является оптоволоконная технология: оптоволоконные датчики деформации с чувствительным элементом на базе решетки Брэгга позволяют производить точные замеры деформации исследуемой поверхности,

при этом они нечувствительны к внешним электромагнитным полям, дешевле и проще монтируемы в сравнении с ближайшими электрическими аналогами [5; 6; 7]. Виброакустические методы обеспечивают высокую достоверность контроля, однако существующие прототипы не позволяют контролировать состояние ЛА в воздухе, а на земле требуют для него длительного времени. Также виброакустические прототипы имеют проблемы чрезмерных массогабаритных показателей, сложности эксплуатации.

Таким образом, целесообразно связать параметры входной вибрации с величиной деформации элемента обшивки ЛА, которую она вызвала. Деформация элемента обшивки контролируется волоконно-оптическим датчиком деформации, сообщаящим на выходе амплитуду деформации и количество циклов нагружения, которое преобразуется в электрический сигнал уже на входе в кабину экипажа и учитывается ЭВМ, которая производит расчёт остаточного ресурса данного элемента конструкции на основании отдельных методик надежности.

Также примем, что в качестве элемента обшивки ЛА подразумевается пластина обшивки хвостовой балки вертолета, изготовленная из дюралюминия (Д16 ГОСТ 4784-97), имеющая незначительную пластичную деформацию, приобретенную за период эксплуатации, и упруго деформирующаяся вследствие вибрации, создаваемой хвостовым винтом.

Результаты и их обсуждение

В простейшем случае в рамках системы с одной степенью свободы деформация в каком-либо её сечении может быть определена как сумма статической (накопленной за предыдущие циклы) деформации и мгновенной деформации в интервале текущего цикла, источником которой могут являться удары, вибрации и т. п. Таким образом

$$\delta_D = \delta_{\max} + A = \left(1 + \frac{A}{\delta_{\max}}\right) \delta_{\max} = K_D \delta_{\max}, \quad (1)$$

где $\delta_{\max}$ – максимальное значение статической деформации образца, Па; A – амплитудное значение мгновенной деформации, мм/м; K_D – коэффициент динамичности при колебаниях.

Если деформация образца не превышает предела упругости материала, из которого он изготовлен, то возникающие напряжения пропорциональны деформациям:

$$p_D = p_C \left(1 + \frac{A}{\delta_{\max}}\right) = K_D p_C. \quad (2)$$

Тогда актуально следующее условие прочности:

$$p_D < [p],$$

где $[p]$ – допускаемая деформация, мм/м.

С учётом (1) и (2) проверка прочности при колебаниях сводится к оценке значения коэффициента динамичности K_D (или оценке амплитуды действующих колебаний) и статических напряжений образца.

Дифференциальное уравнение колебания пластины в отсутствие внешних возмущающих сил (вибраций) имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{Q}{g}x'' + P - Q = \\ = \frac{Q}{g}x'' + P_1 = \frac{Q}{g}x'' + az = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где x – координата геометрического центра пластины, который испытывает максимальные деформации при воздействии вибрации; x'' – второй интеграл координаты по времени, т. е. виброускорение центра пластины, м/с²; P – упругое сопротивление пластины, Па; $P_1 = (P - Q)$ – восстанавливающая сила, Па; Q – вес пластины, приведенный к центру пластины, Н; g – ускорение свободного падения м/с²; a – коэффициент пропорциональности, характеризующий необходимое усилие в направлении приложения вектора Q для единичной статической деформации пластины.

P_1 представляет собой дополнительное упругое сопротивление, возникающее как ответ на изменение координаты x (точки приведения массы пластины). В пределах упругой деформации материала пластины можно принять, что $P_1 = ax$.

Если в уравнении (3) учесть воздействие вибрации S в плоскости приложения веса пластины Q и сопротивление со стороны среды R , то:

$$\begin{aligned} \frac{Q}{g}x'' + P - Q - S + R = \frac{Q}{g}x'' + \\ + P_1 - S + R = \\ = \frac{Q}{g}x'' + az - S + R = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где S – вибрация, меняющаяся по случайному закону, Па; R – реакция со стороны среды, Па.

В большинстве случаев противодействие среды R принимается пропорциональным виброскорости объекта:

$$R = rx'.$$

В случае, когда вибрация имеет синусоидальный характер, уравнение (4) принимает вид

$$\frac{Q}{g}x'' + rx' + az = S_{\max} \sin \omega t, \quad (5)$$

где $S_{\max}$ – амплитуда вибрации, м; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота вибрации, Гц.

Вводя коэффициент затухания n (6), уравнение (5) можно привести к виду (7):

$$n = \frac{rg}{2Q}, \quad (6)$$

где ω_0 – частота свободных колебаний пластины, возникающей в отсутствие S и R , Гц; n – коэффициент затухания.

$$x'' + 2nx' + \omega_0^2 x = \frac{gx}{Q} \sin \omega t. \quad (7)$$

Тогда амплитуда вынужденных колебаний пластины в геометрическом центре составит

$$\begin{aligned} A = \frac{H}{\frac{Q}{g} \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2) + 4n^2 \omega^2}} = \\ = \frac{\delta_n}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 4\left(\frac{n}{\omega_0}\right)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2}} = \beta \delta_n, \end{aligned} \quad (8)$$

где β – коэффициент нарастания колебаний; δ_n – статическая деформация пластины при $S_{\max}$, м/м.

Для исключения резонансного эффекта рекомендуется на этапе проектирования добиваться отношения частот:

$$0,7 \leq \frac{\omega}{\omega_0} \leq 1,3.$$

Учитывая эффект снижения собственной частоты колебания пластины с ростом усталостных напряжений, целесообразным представляется [1]:

$$0,7...0,8 \leq \frac{\omega}{\omega_0}.$$

Таким образом, на основании известных амплитуды вибрации пластины, материала, из которого она изготовлена, её конструктивных и технологических параметров возможно произвести расчёт максимальной деформации пластины.

Оптоволоконные датчики давления с чувствительным элементом, выполненным на решетке Брэгга, преобразуют измеренную деформацию в изменение энергетического спектра отраженной световой волны [7; 8; 9]:

$$\lambda_B = 2n_{\text{эфф}}\Lambda, \quad (9)$$

где λ_B – длина брэгговской волны, нм; $n_{\text{эфф}}$ – эффективный показатель преломления сердцевины световода; Λ – период брэгговской решетки, нм.

Таким образом, остаточный ресурс пластины (элемента обшивки ЛА) возможно контролировать, фиксируя изменение её (его) амплитуды вынужденных колебаний (вибрации) при помощи оптоволоконных датчиков деформации. Произведя предварительную оценку амплитуд вынужденных колебаний ряда прототипных пластин той же конфигурации и усреднив полученные значения,

следует ввести в полученную математическую модель оценки остаточного ресурса значение предельно допустимого напряженно-деформированного состояния (НДС) для данного элемента обшивки, при достижении которого реальным показателем эксплуатации ЛА следует прекратить до замены критичного элемента обшивки, т. е. реализуя принцип эксплуатации ЛА *по его техническому состоянию*.

Следует отметить, что с увеличением числа НДС в структуре образца имеет место не только изменение амплитуды деформации при воздействии вибрации с постоянными характеристиками [10], на принципе которой построена описанная выше математическая модель, но и другие события, например, снижение частоты собственных колебаний [11] пластины. Большой объем экспериментальной базы и теоретических трудов именно по первому явлению [12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20] при отсутствии необходимости применения второго как самоцели с точки зрения получения практического результата наиболее простым способом обуславливает выбор авторов статьи.

Авторы статьи обращают внимание на тот факт, что оптоволоконная архитектура СКД помимо описанных выше достоинств обладает ещё одним – хорошей конструктивной масштабируемостью, позволяющей при необходимости увеличивать число датчиков деформации на обшивке ЛА. В таком случае понадобится обновление базы данных в ча-

сти добавления предотказных параметров для элементов обшивки, вновь включенных в контур контроля СКД.

Выводы

Предложенная математическая модель связывает параметры вибрации гармонического характера, действующей на элемент конструкции (обшивки) ЛА, вызываемую ею величину деформации элемента обшивки и длину брэгговской волны с датчика давления и деформации

на поверхности обшивки, что после преобразования в электрический сигнал позволяет считывать, анализировать и накапливать данные о техническом состоянии данного элемента обшивки в сегменте встроенной памяти СКД.

Предложенная математическая модель требует программного моделирования и процесса доводки и уточнения методом многократных итераций и практических испытаний на реальных элементах обшивки ЛА.

Список литературы

1. Коптев Д. С., Мухин И. Е. Практические результаты расчетно-экспериментальных исследований по определению диапазонов изменения основных контролируемых параметров перспективных авиационных комплексов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 1, № 3. С. 39–60.
2. Сизонов И. И., Мухин И. Е., Барабушка А. С. Подходы к определению остаточного ресурса основных узлов вертолёта с учётом выполненных профилей полёта // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 1, № 3. С. 61–73.
3. Бушуева М. Е., Беляков В. В. Диагностика сложных технических систем // Разработка радиационно стойких полупроводниковых приборов для систем связи и прецизионных измерений с использованием шумового анализа: труды 1-го совещания по проекту НАТО SfP-973799 Semiconductors. Н. Новгород: Талам, 2001. С. 63–98.
4. Мухин И. Е., Селезнев С. Л. Стратегия разработки систем диагностики и прогности технического состояния перспективных летательных аппаратов // Форум «Армия-2023»: материалы круглого стола. М.: Кубинка-1, 2023.
5. Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring / José Miguel López-Higuera, Luis Rodriguez Cobo, Antonio Quintela Incera, Adolfo Cobo // Journal Of Lightwave Technology. 2011. Vol. 29, N 4. P. 587–608.
6. Fidanboyly K., Efendioglu H. S. Fiber Optic Sensors And Their Applications // International Advanced Technologies Symposium (IATS'09), May 13–15, 2009. Karabuk, Turkey. P. 72–78.
7. Варжель С. В. Волоконные брэгговские решетки. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 65 с.

8. Медведков О. И., Королев И. Г., Васильев С. А. Запись волоконных брэгговских решеток в схеме с интерферометром Ллойда и моделирование их спектральных свойств / Российская академия наук. М., 2004. 46 с.

9. Russell S. J. A novel method for the localization of buried optical cables, where an incident EM-wave modulated the polarization of guided light using the Faraday effect // Measurement science and technology. 2004. N 15. P. 1–8.

10. Торгованов А. О., Московитин Г. В. Экспериментальное исследование деградации упругих свойств алюминиевых образцов при циклическом нагружении // XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС – 2019): сборник трудов конференции / Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук. М., 2019. С. 191–194.

11. Виброскоростная характеристика усталостного разрушения материала и конструкций / И. Н. Овчинников, А. В. Артемьев, В. Н. Бакулин, Д. В. Бакулин, И. Д. Неутов [и др.] // Материалы XXI Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2019), 2019 г., Алушта. М.: Издательство Московского авиационного института, 2019. С. 308–310.

12. Вибрация в технике / под ред. В. Н. Челомея. М.: Машиностроение, 1981. Т. 5. 496 с.

13. Жихарь А. И., Лубенко В. Н. Вибрационная математическая модель судовых трубопроводов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2007. № 2 (37). С. 103–106.

14. Ермишкин В. А., Овчинников И. Н. Оценка опасности режимов циклического нагружения для усталостной повреждаемости материалов // Актуальные проблемы надежности технологических, энергетических и транспортных машин: труды Международной научно-технической конференции. Самара, 2003. С. 414–421.

15. Овчинников И. Н. Диагностика усталостного разрушения материала через достоверность результатов испытаний на вибрацию // Материалы XII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ'2018), 2018 г., Алушта. М.: Издательство Московского авиационного института, 2018. С. 425–427.

16. Ovchinnikov I. N., Stepnev V. A., Brantsevich P. Yu. Authenticity of the equivalent vibration tests // Proceedings 19 International Congress on Sound and Vibration. Vilnius, Lithuania, 2012. P. 45.

17. Вибрация в технике / под ред. В. Н. Челомея. М.: Машиностроение, 1981. 496 с.

18. Ермишкин В. А., Мурат Д. П., Лепёшкин Ю. Д. Фотометрическая диагностика усталостного разрушения металлических материалов // Деформация и разрушение ма-

териалов и наноматериалов: сборник статей по материалам II Международной конференции / Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН. М., 2007. С. 605–613.

19. Остаточные напряжения и портативные рентгеновские дифрактометры для их определения / А. В. Котелкин, А. Д. Звонков, А. В. Лютцау, Д. Б. Матвеев. М.: ИРИАС, 2009. С. 423–435.

20. Определение остаточного ресурса и методы повышения уровня безопасности при эксплуатации конструкционных материалов в авиации / А. В. Котелкин, И. Г. Роберов, Д. Б. Матвеев, И. С. Леднев // Современные материалы, техника и технологии. 2016. № 1 (4). С. 104–113.

References

1. Koptev D. S., Mukhin I. E. Prakticheskie rezul'taty raschetno-eksperimental'nyh issledovaniy po opredeleniyu diapazonov izmeneniya osnovnykh kontroliruemykh parametrov perspektivnykh aviacionnykh kompleksov [Practical results of computational and experimental studies to determine the ranges of changes in the basic controlled parameters of promising aviation complexes]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universitetyu. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2023, vol. 1, no. 3, pp. 39–60.

2. Sizonov I. I., Mukhin I. E., Barabushka A. S. Podhody k opredeleniyu osta-tochnogo resursa osnovnykh uzlov vertolyota s uchyotom vypolnennykh profilej polyota [Approaches to determining the remaining resource of the main components of the helicopter, taking into account the completed field profiles]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2023, vol. 1, no. 3, pp. 61–73.

3. Bushueva M. E., Belyakov V. V. [Diagnostics of complex technical systems]. *Razrabotka radiacionno stojkih poluprovodnikovyyh priborov dlya sistem svyazi i precizionnykh izmerenij s ispol'zovaniem shumovogo analiza. Trudy 1-go soveshchaniya po proektu NATO SfP-973799 Semiconductors* [Development of radiation-resistant semiconductor devices for communication systems and precision measurements using noise analysis. Proceedings of the 1st meeting on the NATO project SfP-973799 Semiconductors]. N. Novgorod, Talam Publ., 2001, pp. 63–98. (In Russ.)

4. Mukhin I. E., Seleznev S. L. [Strategy for the development of diagnostic systems and diagnostics of the technical condition of promising aircraft]. *Forum "Armiya – 2023". Materialy kruglogo stola* [Forum "Army-2023". Materials of the round table]. Moscow, Kubinka-1 Publ., 2023. (In Russ.)

5. José Miguel López-Higuera, Luis Rodriguez Cobo, Antonio Quintela Incera, Adolfo Cobo. Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, vol. 29, no. 4, pp. 587–608.
6. Fidanboyly K., Efendioglu H. S. Fiber Optic Sensors And Their Applications. International Advanced Technologies Symposium (IATS'09), May 13–15, 2009. Karabuk, Turkey, pp. 72–78.
7. Varzhel S. V. Volokonnye breggovskie reshetki [Fiber Bragg gratings]. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2015. 65 p.
8. Medvedkov O. I., Korolev I. G., Vasiliev S. A. Zapis' volokonnykh breggovskikh reshetok v skheme s interferometrom Lloyda i modelirovanie ih spektral'nykh svoystv [Recording of fiber Bragg gratings in a scheme with a Lloyd interferometer and modeling of their spectral properties]. Moscow, Russian Academy of Sciences Publ., 2004. 46 p.
9. Russell S. J. A novel method for the localization of buried optical cables, where an incident EM-wave modulated the polarization of guided light using the Faraday effect. *Measurement Science and Technology*, 2004, no. 15, pp. 1–8.
10. Torgovanov A. O., Moskovitin G. V. [Experimental study of the degradation of elastic properties of aluminum samples under cyclic loading]. *XXXI Mezhdunarodnaya innovatsionnaya konferenciya molodykh uchenykh i studentov po problemam mashinovedeniya (MIKMUS – 2019). Sbornik trudov konferencii* [XXXI International Innovative Conference of Young scientists and Students on problems of Machine science (MICMUS – 2019). Proceedings of the conference]. Moscow, A. A. Blagonravov Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences Publ., 2019, pp. 191–194. (In Russ.)
11. Ovchinnikov I. N., Artemyev A. V., Bakulin V. N., Bakulin D. V., Neutov I. D., eds. [Vibration-velocity characteristics of fatigue failure of materials and structures]. *Materialy XXI Mezhdunarodnoj konferencii po vychisli-tel'noj mekhanike i sovremennym prikladnym programmnyim sistemam (VMSPPS'2019), 2019 g., Alushta* [Proceedings of the XXI International Conference on Computational Mechanics and Modern Applied Software Systems (VMSPPS'2019), 2019, Alushta]. Moscow, Moscow Aviation Institute Publ., 2019, pp. 308–310. (In Russ.)
12. Vibratsiya v tekhnike [Vibration in technology]; ed. by V. N. Chelomey. Moscow, Mechanical Engineering, 1981, vol. 5. 496 p.
13. Zhikhar A. I., Lubenko V. N. Vibratsionnaya matematicheskaya model' sudovykh truboprovodov [Vibration mathematical model of ship pipelines]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya = Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology*, 2007, no. 2 (37), pp. 103–106.

14. Ermishkin V. A., Ovchinnikov I. N. [Hazard assessment of the danger of cyclic loading modes for fatigue damage of materials]. *Aktual'nye problemy nadezhnosti tekhnologicheskikh, energeticheskikh i transportnykh mashin. Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Actual problems of reliability of technological, energy and transport machines: proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Samara, 2003, pp. 414-421. (In Russ.)
15. Ovchinnikov I. N. [Diagnostics of fatigue failure of the material through the reliability of vibration test results]. *Materialy XII Mezhdunarodnoy konferencii po prikladnoy matematike i mekhanike v aerokosmicheskoy otrasli (NPNJ'2018), 2018 g., Alushta* [Proceedings of the XII International Conference on Applied Mathematics and Mechanics in the Aerospace Industry (NPNJ'2018), 2018, Alushta]. Moscow, Moscow Aviation Institute Publ., 2018, pp. 425–427. (In Russ.)
16. Ovchinnikov I. N., Stepnev V. A., Brantsevich P. Yu. Authenticity of the equivalent vibration tests. Proceedings 19 International Congress on Sound and Vibration. Vilnius, Lithuania, 2012, p. 45.
17. Vibratsiya v tekhnike [Vibration in technology]; ed. by V. N. Chelomey. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 1981. 496 p.
18. Ermishkin V. A., Murat D. P., Lepeshkin Yu. D. [Photometric diagnostics of fatigue failure of metallic materials]. *Deformatsiya i razrushenie materialov i nanomaterialov. Sbornik statej po materialam II Mezhdunarodnoy konferencii* [Deformation and destruction of materials and nanomaterials. Collection of articles based on the materials of the II International Conference]. Moscow, A. A. Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences Publ., 2007, pp. 605-613. (In Russ.)
19. Kotelkin A. V., Zvonov A. D., Lutzau A. V., Matveev D. B. Ostatochnye napryazheniya i portativnye rentgenovskie diffraktometry dlya ih opredeleniya [Residual stresses and portable X-ray diffractometers for their determination]. Moscow, IRIAS Publ., 2009, pp. 423–435.
20. Kotelkin A. V., Roberov I. G., Matveev D. B., Lednev I. S. Opreделение ostatochnogo resursa i metody povysheniya urovnya bezopasnosti pri ekspluatirovanii konstrukcionnykh materialov v aviatsii [Determination of the residual resource and methods of increasing the level of safety in the operation of structural materials in aviation]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern Materials, Equipment and Technologies*, 2016, no. 1 (4), pp. 104–113.

Информация об авторах / Information about the Authors

Сизонов Иван Игоревич, студент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Ivan.sizonov2017@yandex.ru, ORCID: 0009-0008-0697-091X

Ivan I. Sizonov, Student of the Department of Space Instrumentation and Communication, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: Ivan.sizonov2017@yandex.ru, ORCID: 0009-0008-0697-091X

Барабушка Александр Сергеевич, заместитель генерального конструктора, Национальный центр вертолетостроения имени М. Л. Миля и Н. И. Камова, Томилино, Московская область, Российская Федерация, e-mail: bas2701@yandex.ru

Alexander S. Barabushka, Deputy General Designer, M. L. Mil and N. I. Kamov National Helicopter Building Center, Tomilino, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: bas2701@yandex.ru

Мухин Иван Ефимович, доктор технических наук, профессор кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: MukhinI@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0005-1583-6550

Ivan E. Mukhin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Space Instrumentation and Communications, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: MukhinI@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0005-1583-6550

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-64-81>



УДК 004.5:004.8

Гибридный метод контроля мышечной усталости в робототехнической системе

А. А. Кузьмин¹ ✉, Р. А. Томакова¹, Е. В. Петрунина²,
Д. А. Ермаков¹, С. Кадырова¹

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

² Московский политехнический университет
ул. Большая Семёновская д. 38, г. Москва 107023, Российская Федерация

✉ e-mail: Ku3bmin@gmail.com

Резюме

Цель исследования – разработка метода контроля мышечной усталости в робототехнических устройствах, работающих в комбинированном режиме.

Методы. Для вычисления экзогенного момента сил робототехнического устройства предложен дешифратор поверхностного электромиосигнала, который учитывает эффект мышечной усталости оператора. Путем дешифрации электромиосигнала определяется ассистирующий момент на серводвигатели робототехнического устройства. При расчете ассистирующего момента принимается во внимание степень мышечной усталости. Метод оценки мышечной усталости заключается в оценке показателя синхронности электромиосигналов на мышцах-синергистах и основан на гибридном подходе формирования модуля принятия решений. Первый модуль принятия решения построен на основе нейросетевого классификатора, дескрипторы для которого формируются на основе анализа спектров электромиосигналов мышц-синергистов. Второй модуль принятия решения включает два канала синергии на каждый электромиографический канал. Первый канал синергии получают посредством амплитудной демодуляции электромиосигнала, а второй – посредством его частотной демодуляции. В результате получаем два классификатора мышечной усталости, решения которых интегрируются агрегатором.

Результаты. Проведены экспериментальные исследования зависимости электромиосигнала от величины мышечного усилия и от его длительности, которые показали, что относительное изменение усредненного показателя RMS при статичной нагрузке может служить объективным показателем степени усталости мышцы.

Заключение. Разработанный метод позволяет управлять механическими моментами на серводвигателях робототехнического устройства адекватно тестовой мышечной нагрузке и функциональному состоянию мышц пользователя. Метод позволяет осуществлять индивидуальную настройку блока нейросетевого классификатора и блока нечеткого логического вывода с последующей агрегацией их решений и таким образом оптимизировать комбинированный режим работы робототехнического устройства.

Ключевые слова: робототехническое устройство; электромиосигнал; эффект мышечной усталости; нечеткая модель принятия решений; нейросетевой классификатор.

© Кузьмин А. А., Томакова Р. А., Петрунина Е. В., Ермаков Д. А., Кадырова С., 2023

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

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

Для цитирования: Гибридный метод контроля мышечной усталости в робототехнической системе / А. А. Кузьмин, Р. А. Томакова, Е. В. Петрунина, Д. А. Ермаков, С. Кадырова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 3. С. 64–81. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-64-81>.

Поступила в редакцию 11.07.2023

Подписана в печать 10.08.2023

Опубликована 29.09.2023

Hybrid Method for Controlling Muscle Fatigue in the Robotic System

Aleksandr A. Kuzmin¹ ✉, Rimma A. Tomakova¹, Elena V. Petrunina²,
Dmitriy A. Ermakov¹, Sofia Kadyrova¹

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

² Moscow Polytechnic University
38 Bol'shaya Semyonovskaya Str., Moscow 107023, Russian Federation

✉ e-mail: Ku3bmin@gmail.com

Abstract

The purpose of research is development of a method for controlling muscle fatigue in robotic devices operating in a combined mode.

Methods. To calculate the exogenous moment of forces of a robotic device, a surface electromyosignal decoder is proposed, which takes into account the effect of the operator's muscle fatigue. By decoding the electromyosignal, the assisting torque on the servomotors of the robotic device is determined. When calculating the assisting moment, the degree of muscle fatigue is taken into account. The method for assessing muscle fatigue consists in assessing the indicator of synchronism of electromyosignals on synergistic muscles and is based on a hybrid approach to the formation of a decision-making module. The first decision-making module is built on the basis of a neural network classifier, the descriptors for which are formed based on the analysis of the spectra of electromyosignals of synergistic muscles. The second decision module includes two synergy channels per electromyographic channel. The first synergy channel is obtained by amplitude demodulation of the electromyosignal, and the second - by its frequency demodulation. As a result, we obtain two muscle fatigue classifiers, the solutions of which are integrated by the aggregator.

Results. Experimental studies of the dependence of the electromyosignal on the magnitude of muscle effort and its duration were carried out, which showed that the relative change in the average RMS index under static load can serve as an objective indicator of the degree of muscle fatigue.

Conclusion. The developed method makes it possible to control the mechanical moments on the servomotors of a robotic device adequately to the test muscle load and the functional state of the user's muscles. The method allows for individual adjustment of the neural network classifier block and the fuzzy inference block with subsequent aggregation of their solutions and thus optimize the combined operation mode of the robotic device.

Keywords: probability of making the right decision; diagnostics; reliability of control; information description; quantitative parameters; error of the first and second kind; completeness of control; complex technical object; technical condition; expert assessments of qualitative signs; efficiency.

Funding: The research was carried out within the framework of the implementation of the development program of the Southwest State University of the strategic academic leadership program "Priority-2030".

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

For citation: Kuzmin A. A., Tomakova R. A., Petrunina E. V., Ermakov D. A., Kadyrova S. Hybrid Method for Controlling Muscle Fatigue in the Robotic System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(3): 64–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-64-81>.

Received 11.07.2023

Accepted 10.08.2023

Published 29.09.2023

Введение

В последние годы в робототехнической технике все шире используются устройства, выполняющие функции ассистента при выполнении оператором тяжелой физической работы или нагрузочных пробах при прохождении пациентом курса реабилитации [1; 2; 3; 4]. Как в том, так и другом случае робототехническому устройству необходимо оценить размеры физической помощи, необходимой оператору для выполнения заданного физического упражнения. Если на робототехническое устройство перекладывается вся физическая нагрузка пользователя, то оценить размер помощи не представляет труда, для этого необходимо измерить моменты на соответствующих серводвигателях. Однако в ряде случаев в процесс выполнения работы необходимо задействовать оператора, поделив выполняемую физическую работу между пользователем и

робототехническим устройством в некоторой пропорции [5; 6; 7; 8]. Для вычисления этого соотношения необходима информация как о физических возможностях оператора, так и о его функциональном состоянии, которую в физиологических и клинических исследованиях получают посредством дешифрации поверхностной электромиограммы¹ (пЭМГ) или/и электроэнцефалограммы [6; 9; 10; 11].

Мышцы человека даже при внешней помощи могут утомиться, и работоспособность человека или его физические возможности при этом значительно снизятся. Механизмы развития этого процесса зависят от индивидуальных особенностей человека, от характера его деятельности, уровня профессиональной и физической подготовки. Регуляция в таких случаях осуществляется как нервным, так и гуморальным путем. Вопрос о роли гуморальных и периферических

¹ Трифонов А. А. Биотехническая система нейрофизиологической реабилитации с робототехническим устройством, управля-

емым посредством дешифрации электромиосигналов: дис. ... канд. техн. наук, Курск, 2021. 150 с.

изменений в развитии утомления при работе различных групп мышц является дискуссионным. Таким образом, информация об утомлении мышц может быть полезна для улучшения управления робототехническим устройством, а также для обеспечения безопасности пациента во время реабилитации или снижения нагрузки на мышцы оператора при подъеме тяжелых предметов [11; 12; 13; 14].

Материалы и методы

В представленном методе оценки мышечной усталости, а следовательно, и

для коррекции экзогенного момента используется пЭМГ. Метод основан на анализе двух паттернов мышечной синергии и передачи результатов этого анализа в процессор робототехнического устройства [3; 15; 16]. В качестве исходной информации о мышечном утомлении используются показатели синхронности двух паттернов мышечной синергии, из которых формируются два показателя синхронности – $Z1$ и $Z2$. Структурная схема их формирования представлена ниже (рис. 1).

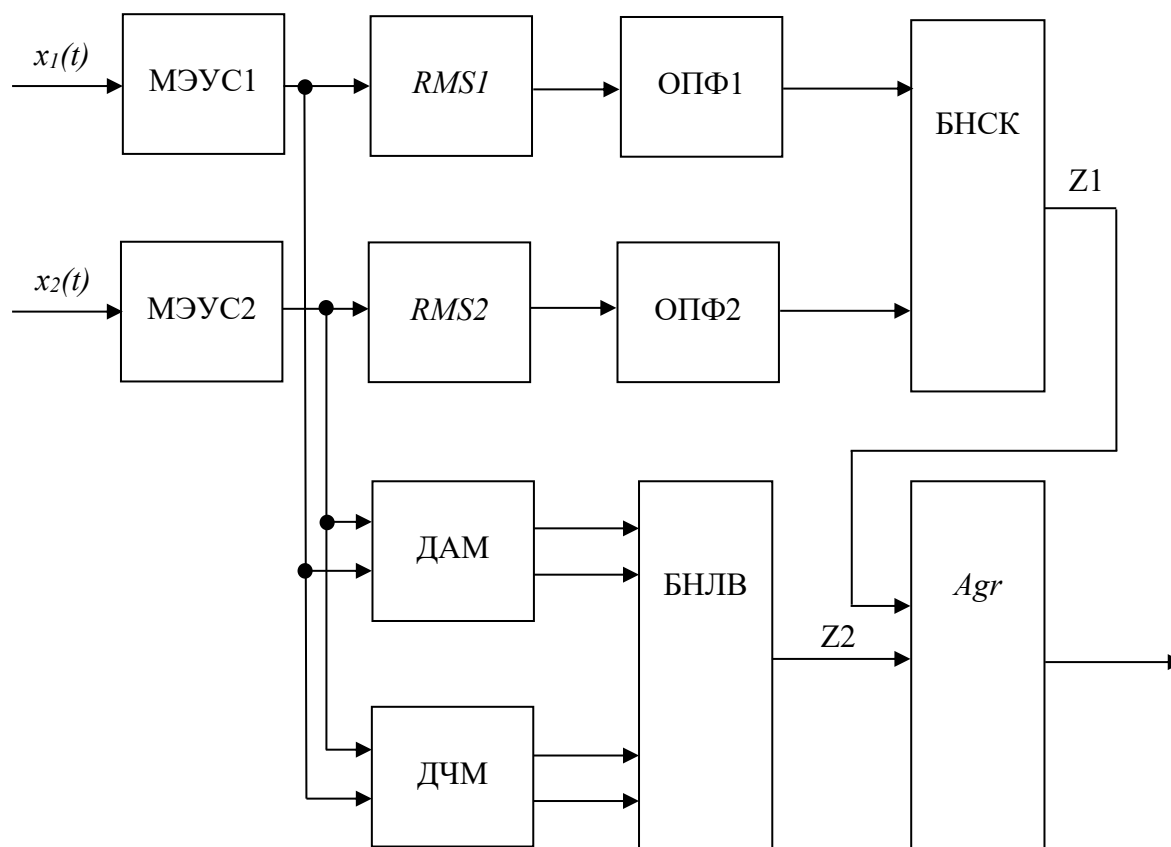


Рис. 1. Структурная схема формирования показателей синхронности паттернов пЭМГ

Fig. 1. Block diagram of the formation of indicators of synchrony of sEMG patterns

Электроды миоэлектронных устройств считывания (МЭУС) устанавливаются на мышцы-агонисты и мышцы-синергисты,

или на мышцы-антагонисты и мышцы-синергисты. В результате получаем два паттерна мышечной синергии – $x_1(t)$ и $x_2(t)$.

Паттерны анализируются, и результат их анализа используется бортовым процессором робототехнического устройства для коррекции экзогенного момента. С этой целью используется не менее двух МЭУС. Сигналы в двух каналах пЭМГ усиливаются усилителями биопотенциалов МЭУС [9; 10; 17; 18].

Для формирования показателя синхронности $Z1$ отчеты пЭМГ $x_1(t)$ и $x_2(t)$

преобразуются в отчеты RMS по формуле

$$RMS[m] = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=m-n}^m x_k^2}, \quad (1)$$

где n – число дискретных отсчетов x_k пЭМГ, которые накапливаются в микроконтроллере до текущего отсчета m .

Рассмотрим пример установки шести электродов для формирования двух паттернов – $x_1(t)$ и $x_2(t)$ (рис. 2).

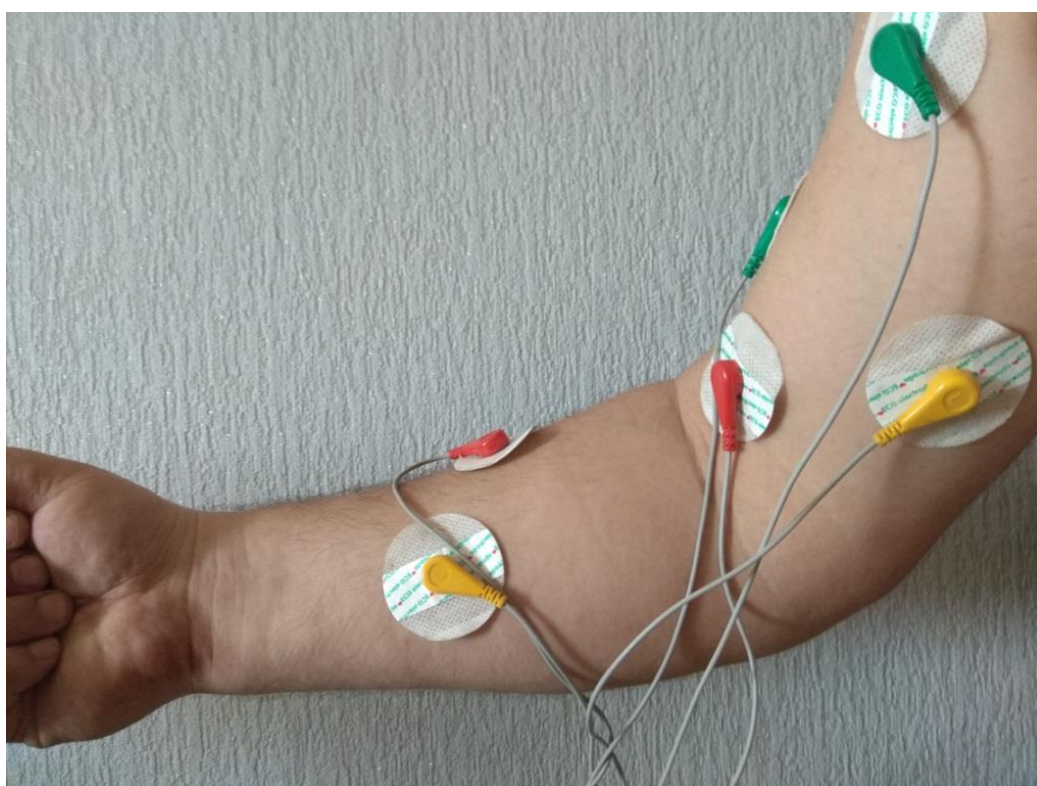


Рис. 2. Фотография расположения электродов на двуглавой мышце плеча и на плечелучевой мышце для организации двухканальной записи пЭМГ

Fig. 2. Photograph of the location of the electrodes on the biceps muscle of the shoulder and on the brachioradialis muscle for organizing a two-channel sEMG recording.

Для получения исходных данных для формирования дескрипторов в блоке нейросетевого классификатора (БНСК) используются спектральные коэффициенты RMS , вычисляемые в модулях оконного преобразования Фурье (ОПФ).

Для определения показателя синхронности и на его основе дескрипторов нейронной сети БНСК используется взаимный спектр RMS в двух каналах пЭМГ, определяемый по формуле

$$W_{x_1, x_2} = \frac{1}{N \cdot \Delta t} RMS1(f) \cdot RMS2^*(f), \quad (2)$$

где N – число отсчетов в каналах пЭМГ при дискретизации сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$; Δt – шаг дискретизации пЭМГ, с;

$$RMS1(f) = \Delta t \cdot \sum_{n=0}^{N-1} RMS1[n] \times \exp(-j \cdot 2 \cdot \pi f \cdot n \cdot \Delta t);$$

$$RMS2(f) = \Delta t \cdot \sum_{n=0}^{N-1} RMS2[n] \times \exp(-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot n \cdot \Delta t).$$

Для формирования показателя Z2 используется блок нечеткого логического вывода (БНЧВ), структурно-функциональная схема которого представ-

лена ниже (рис. 3). На его входе образуются два подканала пЭМГ. Сигнал в первом подканале получают в результате амплитудного детектирования пЭМГ в блоке ДАМ ($x_{a1}[t_i]$ и $x_{a2}[t_i]$), а сигнал во втором подканале – в результате частотного детектирования пЭМГ в блоке ДЧМ ($x_{u1}[t_i]$ и $x_{u2}[t_i]$). В результате амплитудного и частотного детектирования канальных пЭМГ образуются четыре подканала, сигналы которых передаются в бортовой процессор робототехнического устройства, который осуществляет их программную обработку в БНЛВ.

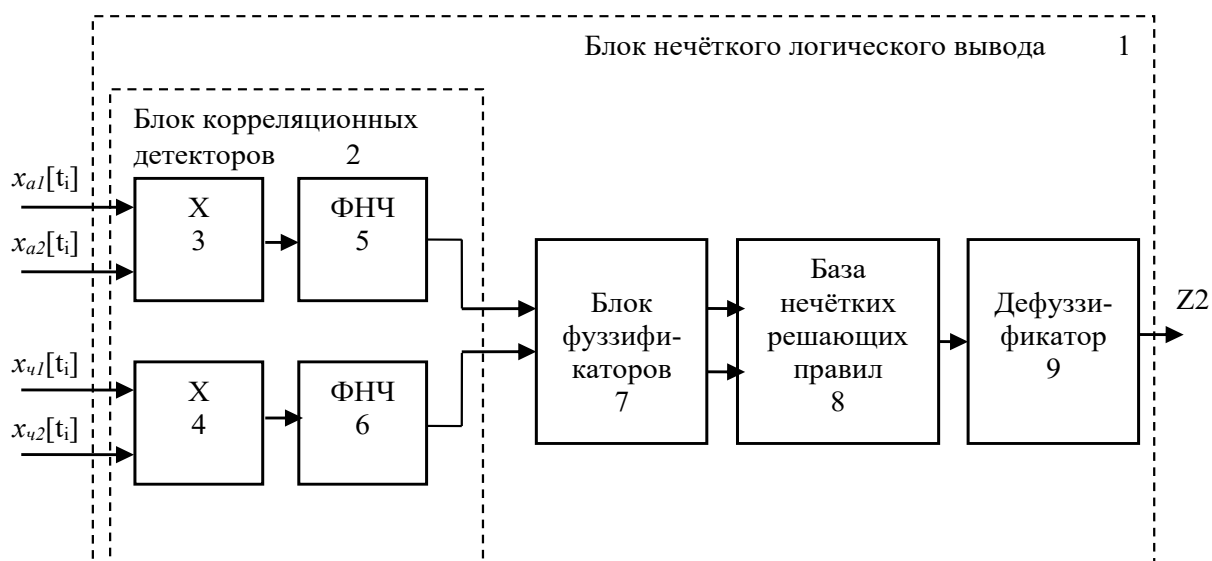


Рис. 3. Структурная схема блока нечёткого логического вывода

Fig. 3. Structural diagram of the fuzzy inference block

Цифровые сигналы $x_{a1}[t_i]$ и $x_{a2}[t_i]$ с подканалов ДАМ и цифровые сигналы $x_{u1}[t_i]$ и $x_{u2}[t_i]$ с подканалов ДЧМ поступают на соответствующие входы блока корреляционных детекторов 2 БНЛВ 1, включающего умножители 3 и 4 и фильтры нижних частот 5 и 6. В результате на

выходе блока корреляционных детекторов формируются два паттерна сигналов синергии:

$$y_1[t_n] = \frac{1}{N} \sum_{i=n}^{n+N-1} x_{a1}[t_i] \cdot x_{a2}[t_i], \quad (3)$$

$$y_2[t_n] = \frac{1}{N} \sum_{i=n}^{n+N-1} x_{u1}[t_i] \cdot x_{u2}[t_i], \quad (4)$$

где N – ширина окна ФНЧ; n – текущий отсчет времени; i – апостериорные отсчеты времени.

Сигналы (3) и (4) поступают на вход блоков фуззификаторов, где они преоб-

разуются, согласно нелинейным преобразованиям, представленным на рисунке 4. Число нелинейных преобразований в блоке фуззификаторов определяется числом термов для паттернов синергии [19; 20].

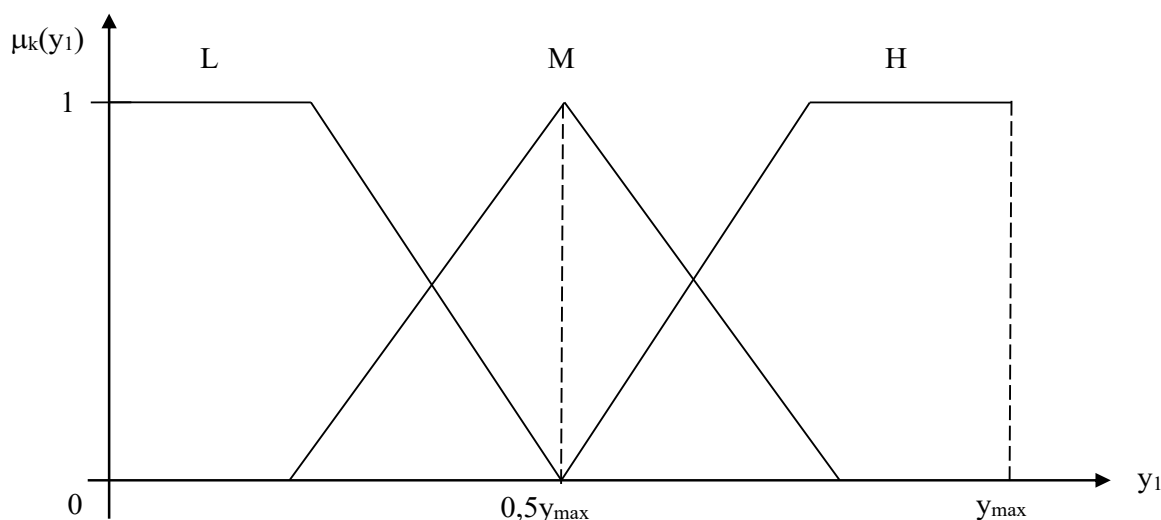


Рис. 4. Функции принадлежности для первого паттерна синергии

Fig. 4. Membership functions for the first synergy pattern

На рисунке 4 представлены функции принадлежности для трех термов паттернов синергии: L, M и H, что соответствует низкому, среднему и высокому уровням корреляции синергистов. Для второго синергетического паттерна строятся аналогичные функции принадлежности.

Выходы фуззификаторов $\mu(y_1)$ и $\mu(y_2)$, полученные согласно нелинейным преобразованиям (рис. 4), поступают в базу нечетких решающих правил (БНРП). В БНРП они выступают как предпосылки (антецеденты). Предпосылки в БНРП объединяются по нечетким функциям. При наличии трех тер-

мов и двух лингвистических переменных следствия (консеквенты) в решающих правилах могут быть сформированы посредством таблицы, строки и столбцы которой соответствуют используемым термам, а в ячейках таблицы записывается терм выходной переменной Z. Если положить, что у выходной лингвистической переменной тоже три терма, то получим таблицу, представленную ниже (рис. 5).

Нумерации столбцов и строк этой таблицы формируют антецеденты решающих правил, а в ячейках эксперты формируют соответствующие консеквенты. Для вычисления четких значений пере-

менной Z_2 , которые поступают в бортовой процессор экзоскелета (рис. 3), необходима дефuzziфикация нечетких термов в соответствии с функциями принадлежности для термов этой перемен-

ной. Эти значения определяют синергетику мышц оператора экзоскелета. На основе ее анализа бортовой процессор управляет серводвигателями робототехнического устройства.

$y_1 \backslash y_2$	L	M	H
L	H	M	M
M	H	M	M
H	M	L	L

$\mu(Z)$ 

Рис. 5. Таблица консеквентов решающих правил для блока нечеткого логического вывода

Fig. 5. Table of consequential decision rules for a block of fuzzy inference

Для агрегации решений БНСК и БНЛВ использовались агрегаторы, методы, модели и алгоритмы, построения которых представлены в работах [14; 17; 18]. При низком или среднем уровне синергии необходимо сформировать экзогенный момент на соответствующий сустав, синергисты которого подключены к соответствующим каналам ЭМГ.

Результаты и их обсуждение

Так как пЭМГ отражает реакцию мышцы на предъявление нагрузки определенного уровня, то для контроля амплитуды и формы сил, действующих на исследуемую мышцу, а следовательно,

для формирования дескрипторов для первого канала Z_1 и для формирования базы нечетких импликаций для второго канала Z_2 необходимо экспериментальным путем определить соответствие между приложенной нагрузкой на мышцы синергисты и параметрами пЭМГ. Для этого нагрузку необходимо прикладывать через измерительный датчик, закрепленный на специальном держателе, вместе они образуют подсистему контроля амплитуды и формы нагрузки. Это позволит формировать обучающие выборки для нейронных сетей БНСК, а также корректировать функции принадлежности в БНЛВ.

Процесс формирования стимулирующего пЭМГ усилия иллюстрирует кинематическая схема, представленная на рисунке 6. Кинематическое звено 1 (модель конечности) жестко связана с консолью 2, в середине которой закреплен тензодатчик 3. К свободному концу консоли 3 прикреплена тарированная пружина 4, на которую подвешивается груз

5. Посредством шкалы 6 и указателя 7 величина груза может быть измерена. Учитывая, что одновременно ведется мониторинг пЭМГ, путем ее дешифрации может быть определена величина нагрузки, что позволяет вычислить соответствующую функцию преобразования и определить силомоментные характеристики на соответствующей конечности.

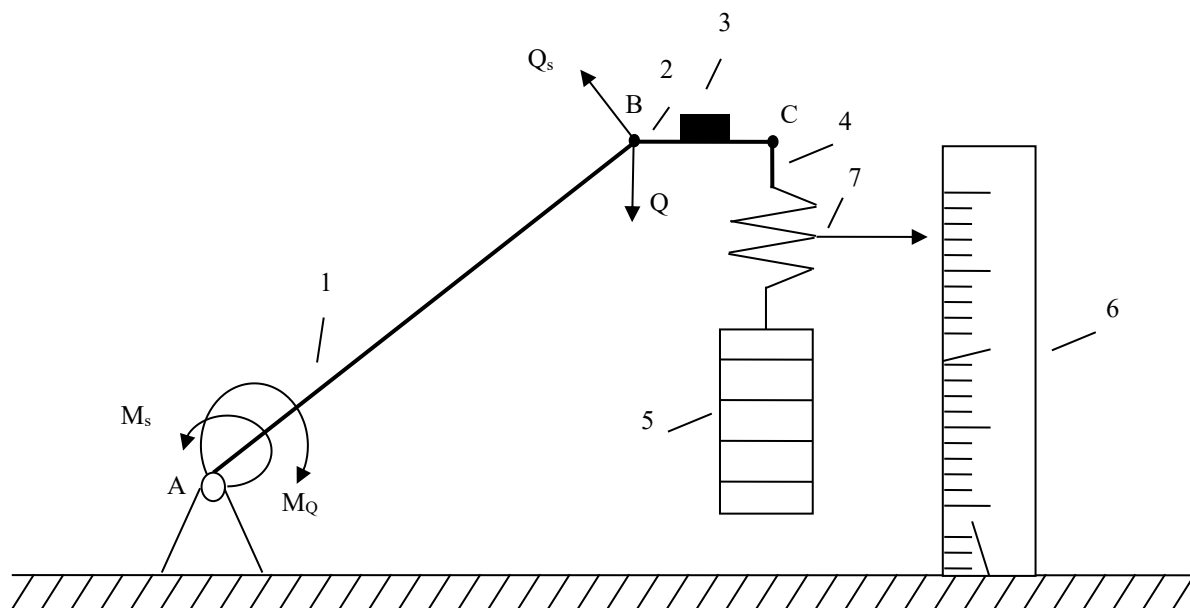


Рис. 6. Кинематическая модель тарирования пЭМГ по мышечной нагрузке

Fig. 6. Kinematic model of taring sEMG according to muscle load

Сила Q уравнивает эталонную нагрузку, которой соответствует момент

$$M_Q = Q \cdot AB \cdot \sin \varphi, \quad (5)$$

где $Q \cdot \sin \varphi$ – проекция Q на направление, перпендикулярное AB .

Момент M_s (рис. 6) – это сумма моментов мышц и экзогенных моментов, получаемых посредством серводвигателей робототехнического устройства. В процессе экспериментальных исследований были изучены зависимости пара-

метров пЭМГ, используемых при построении модулей принятия решений, от величины статических мышечных усилий и их длительности. Как было показано ранее, пЭМГ отражает электрическую активность мышц, а амплитуда такого показателя, как (1), определяет стимулирование мышц для выполнения определенной работы.

В эксперименте для исследования характера этой зависимости пЭМГ снималась в зоне предплечья, где находятся

такие мышцы, как поверхностный сгибатель пальцев, длинная ладонная мышца, лучевой сгибатель запястья и др. Одной из главных функций этих мышц является сгибание кисти. Для контроля величины нагрузки на кисть использовался динамометр электронный медицинский типа ДМЭР. Испытуемому ставилась задача с такой силой сжимать

динамометр, чтобы на экране отображалось определенное значение: 5, 10, 15 и т. д. дан ($\cdot 10$ Ньютон). Таким образом, замыкалась биологическая обратная связь (БОС), которая позволяет связать регистрируемый параметр RMS с усилием динамометра. Рассмотрим общий вид кисти с динамометром и присоединенными электродами (рис. 7).



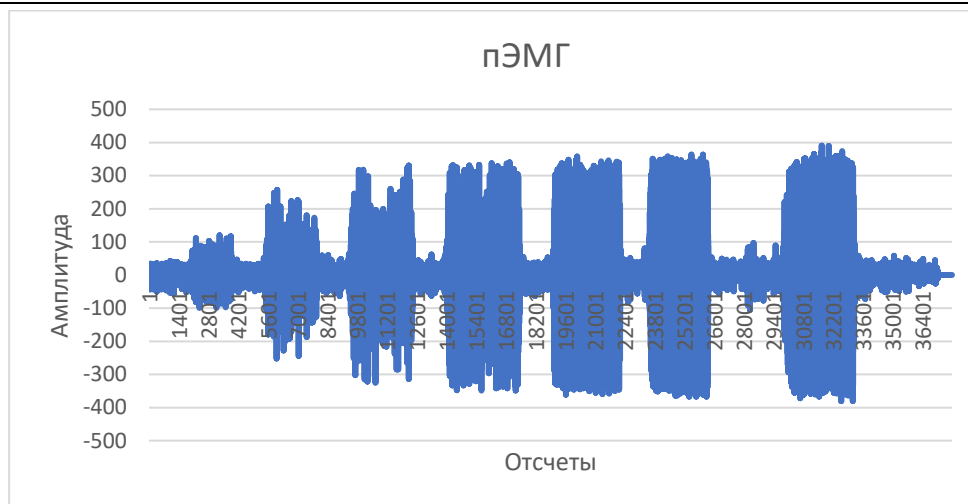
Рис. 7. Общий вид кисти с динамометром и присоединенными электродами

Fig. 7. General view of the hand with a dynamometer and attached electrodes

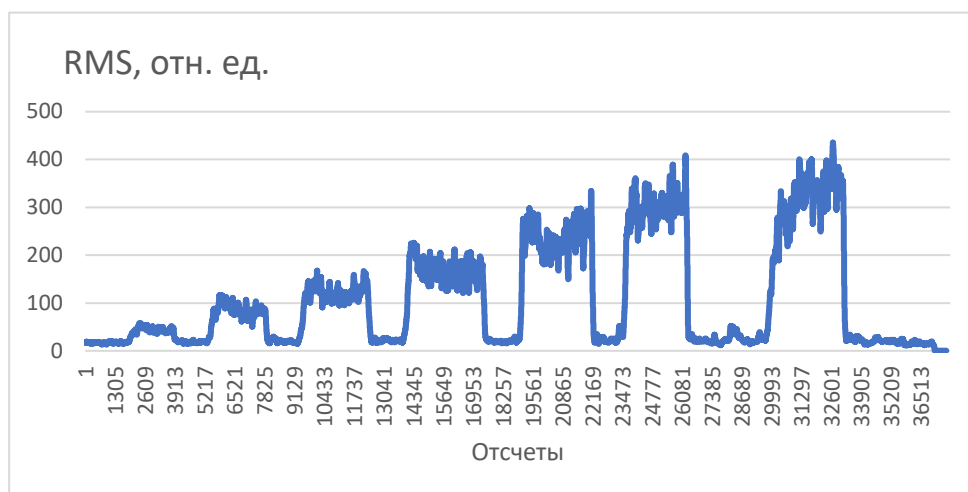
Для начала испытуемому предлагалось повышать показания динамометра «лесенкой»: сначала необходимо было установить на определенное время (около 4-5 секунд) значение в 5 дан (50 Н), затем несколько секунд отдых,

затем в 10 дан, потом отдых, потом в 15 и т. д. до 35 дан.

Результаты зарегистрированной пЭМГ и вычисленной RMS при такой нагрузке приведены ниже (рис. 8).



а



б

Рис. 8. Результаты зарегистрированной пЭМГ (а) и соответствующей RMS (б) при ступенчатой нагрузке в 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35·10Н. Частота дискретизации отсчетов 600 Гц

Fig. 8. The results of the registered sEMG (а) and the corresponding RMS (б) at a stepped load of 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35·10N. Sample rate 600 Hz

Анализ рисунка 8 свидетельствует о том, что значения RMS хоть и характеризуются достаточно большим разбросом (величина которого напрямую зависит от аперттуры окна, в котором вычисляется RMS), но в среднем достаточно хорошо отражают величину усилия, прикладываемую к мышцам, для формирования определенной силы сжатия кисти.

Для исследования возможности применения RMS в качестве одного из дескрипторов для определения степени утомления мышц был проведен эксперимент, когда испытуемому предлагали сжимать динамометр с достаточно большим усилием продолжительное время. Рассмотрим типичный пример из серии экспериментов (рис. 9).

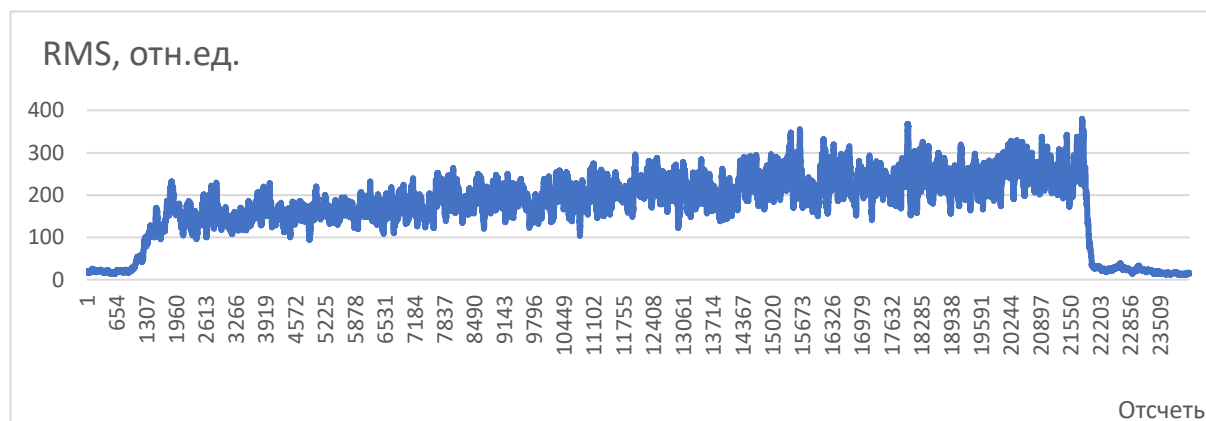


Рис. 9. Изменения RMS при длительной нагрузке в 200 Н. Частота дискретизации отсчетов 600 Гц

Fig. 9. Changes in RMS at a continuous load of 200 N. Sampling frequency of samples 600 Hz

В этом эксперименте испытуемый старался сжимать динамометр с силой 20 дан (200 Н) в течение около 40 секунд. В начале процесса сжатия кисти видны всплески, вызванные перерегулированием и излишним сжатием средства измерения. Таковую особенность формирования усилия в начале нагрузки (перерегулирование или недорегулирование) можно заметить и на рисунке 8. Но в результате БОС параметр RMS стабилизируется около определенной величины, и с течением времени эта величина начинает заметно дрейфовать в сторону увеличения. Заканчивается эксперимент усталостью мышц и дальнейшей невозможностью выдерживать заданную нагрузку. Перед окончанием снятия усилия регистрируется максимальный всплеск RMS, который отражает максимальные усилия, прикладываемые испытуемым для поддержания необходимой силы сжатия динамометра.

Таким образом, относительное изменение усредненного показателя RMS при статичной нагрузке может служить

объективным показателем степени усталости мышцы.

Выводы

Разработан метод оценки мышечной усталости, основанный на гибридном подходе формирования модуля принятия решений, заключающийся в использовании двух классификаторов синхронности электромиосигналов пациента с мышц-синергистов, принимающих участие в процедуре выполнения физического упражнения. Первый классификатор является обучаемым классификатором, и для его обучения используется набор данных, полученный в результате тарирования пЭМГ. Второй классификатор мышечного утомления построен на основе нечеткой логики принятия решений и использует два паттерна мышечной синергии, которые формируются посредством образования в каждом канале электромиосигнала частотного и амплитудного подканалов. В качестве информативных признаков во втором класси-

фикаторе используются показатели корреляции сигналов в частотных подканалах и показатели корреляции сигналов в амплитудных подканалах. По результатам классификации полученных паттернов синергии принимается решение о включении соответствующих серводвигателей робототехнического устройства с целью оказания помощи пользователю при выполнении физических упражнений, в частности, при использовании промышленных и медицинских экзоскелетов.

Разработанный метод позволяет управлять механическими моментами на серводвигателях робототехнического устройства адекватно тестовой мышечной нагрузки и функциональному состоянию мышц оператора. Метод позволяет осуществлять индивидуальную настройку блока нейросетевого классификатора и блока нечеткого логического вывода с последующей агрегацией их решений и таким образом оптимизировать комбинированный режим работы робототехнического устройства.

Список литературы

1. Подъем груза в экзоскелете с гравитационной компенсацией / С. Ф. Яцун, В. М. Антипов, А. Е. Карлов, Х. Х. М. Аль Манджи // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 8–17. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-2-8-17>.
2. 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. Ufa, 2020. P. 237–247.
3. Петрунина Е. В., Томакова Р. А., Филист С. А. Гибридные методы и модели для биотехнических систем с адаптивным управлением диагностическими и реабилитационными процессами / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2022. 249 с.
4. ЭМГ-анализ утомления разных групп инспираторных мышц человека при тяжелых физических нагрузках / М. О. Сегизбаева, Н. П. Александрова, Н. Н. Тимофеев, Е. Н. Курьянович // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 6. С. 898–902.
5. Метод и алгоритмы локализации кластеров адаптационного потенциала в биотехнических системах реабилитации лиц с ограниченными возможностями здоровья / А. В. Бутусов, А. В. Киселев, Е. В. Петрунина, А. Х. А. Хайдер [и др.] // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2023. Т. 11, № 2. С. 1–20. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.41.2.012>.
6. Яцун С. Ф., Антипов В. М., Карлов А. Е. Моделирование подъема груза с помощью промышленного экзоскелета // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 6 (81). С. 14–20.

7. Classification of the Functional State of the Respiratory System Based on the Spectral Analysis of the Electrocardio Signal / М. В. Myasnyankin, А. А. Kuzmin, S. А. Filist, L. V. Shulga // Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems: 2021 International Scientific and Practical Conference. Moscow, 2021. Vol. 2843. P. 10.

8. Пат. 2766764 Российская Федерация, МПК А61В 5/313. Способ оценки мышечной усталости на основе контроля паттернов синергии и устройство для его осуществления / Филист С. А., Трифонов А. А., Кузьмин А. А., Сафронов Р. И., Петрунина Е. В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет». Заявл. 04.03.21; опубл. 15.03.22.

9. 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>.

10. 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.

11. Trifonov A. A., Kuzmin A. A., Filist S. A. Biotechnical System for Control to the Exoskeleton Limb Based on Surface Myosignals for Rehabilitation Complexes // IEEE 14th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). Tashkent, Uzbekistan, 2020. <https://doi.org/10.1109/AICT50176.2020.9368588>.

12. 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.

13. Myasnyankin M. B., Kuzmin A. A., Filist S. A. Neural network classifiers with descriptors obtained on the basis of analysis of the system rhythms in intellectual prediction systems for non-hospital pneumonia // Journal of Physics: Conference Series. 2021. N 1801. P. 012046. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1801/1/012046>.

14. Коряк Ю. А. Нейромышечные изменения под влиянием семисуточной механической разгрузки мышечного аппарата человека // Фундаментальные исследования. 2008. № 9. С. 8–21.

15. Филист С. А., Томакова Р. А., Яа Зар До. Универсальные сетевые модели для задач классификации биомедицинских данных // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4-2(43). С. 44–50.

16. Аль-Бареда А. Я. С., Томакова Р. А., Брежнева А. Н. Алгоритмы синтеза оптимального управления в биотехнических системах реабилитационного типа на основе технологии нейронных сетей // Системный анализ и управление в биотехнических системах. 2018. Т. 17, № 3. С. 718–725.

17. Multimodal neural network classifier of the functional state of the respiratory system / S. A. Filist, M. B. Myasnyankin, R. I. Safronov, A. A. Kuzmin // Journal of Physics: Conference Series. 2021. N 2094. P. 03264. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2094/3/032064>.

18. Biotechnical neural network system for predicting cardiovascular health state using processing of bio-signals / S. Filist, Riad Taha Al-Kasasbeh, O. V. Shatalova, Mohammad Hjoui Btoush, Manafaddin Namazov, Ashraf Adel Shaqadan, Mahdi Alshamasin, N. Korenevskiy, Saleh Aloqeili, M. B. Myasnyankin // International Journal of Medical Engineering and Informatics. 2021. N 1(1). P. 1. <https://doi.org/10.1504/IJMEI.2022.10047451>.

19. Томакова Р. А., Филист С. А., Насер А. А. Нечеткие нейросетевые технологии для выделения сегментов с патологическими образованиями и морфологическими структурами на медицинских изображениях // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 4. С. 43–49.

20. Метод классификации рентгенограмм на основе использования глобальной информации / Р. А. Томакова, М. В. Томаков, И. В. Дураков, В. В. Жилин // Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. № 94 (11). С. 45–51.

References

1. Yatsun S. F., Antipov V. M., Karlov A. E., Al Manji H. H. M. Pod'em gruzu v ekzoskelete s gravitacionnoj kompensaciej [Load Lifting in the Exoskeleton with Gravity Compensation]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2019, vol. 23, no. 2, pp. 8–17. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-2-8-17>

2. 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.

3. Petrunina E. V., Tomakova R. A., Filist S. A. Gibriddnye metody i modeli dlya biotekhnicheskikh sistem s adaptivnym upravleniem diagnosticheskimi i reabilitatsionnymi processami [Hybrid methods and models for biotechnical systems with adaptive control of diagnostic and rehabilitation processes]. Kursk, Southwest State University Publ., 2022. 249 p.

4. Segizbaeva M. O., Alexandrova N. P., Timofeev N. N., Kuryanovich E. N. EMG-analiz utomleniya raznykh grupp inspiratornykh myshc cheloveka pri tyazhelykh fizicheskikh nagruzkah [EMG-analysis of fatigue of different groups of inspiratory muscles of a person under heavy

physical exertion]. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij = International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2016, no. 6, pp. 898–902.

5. Butusov A. V., Kiselev A. V., Petrunina E. V., Haider A. H. A., eds. Metod i algoritmy lokalizacii klasterov adaptacionnogo potenciala v biotekhnicheskikh sistemah reabilitacii lic s ogranicennymi vozmozhnostyami zdorov'ya [Method and algorithms of localization of clusters of adaptive potential in biotechnical systems of rehabilitation of persons with disabilities]. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technologies*, 2023, vol. 11, no. 2, pp. 1–20. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.41.2.012>

6. Yatsun S. F., Antipov V. M., Karlov A. E. Modelirovanie pod"ema gruzha s pomoshch'yu promyshlennogo ekzoskeleta [Modeling of cargo lifting using an industrial exoskeleton]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 6 (81), pp. 14–20.

7. Myasnyankin M. B., Kuzmin A. A., Filist S. A., Shulga L. V. Classification of the Functional State of the Respiratory System Based on the Spectral Analysis of the Electrocardio Signal. *Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems: 2021 International Scientific and Practical Conference. Moscow, 2021*, vol. 2843, p. 10.

8. Filist S. A., Trifonov A. A., Kuzmin A. A., Safronov R. I., Petrunina E. V. Sposob ocenki myshechnoj ustalosti na osnove kontrolya patternov sinergii i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya [A method for assessing muscle fatigue based on the control of synergy patterns and a device for its implementation]. Patent RF, no. 2766764, 2022.

9. Filist S. A., Petrunina E. V., Trifonov A. A., Serebrovsky A. V. Kodovye obrazy signalov elektroencefalogrammy dlya upravleniya roboto-tekhnicheskimi ustroystvami posredstvom interfejsa "mozgkomp'yuter" [Code images of electroencephalogram signals for controlling robotic-technical devices through the "brain-computer interface"]. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii. Nauchnyj zhurnal = Modeling, Optimization and Information Technologies. Scientific Journal*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 67–79. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.24.1.025>

10. Trifonov A. A., Filist S. A., Kuzmin A. A., Zhilin V. V., Petrunina E. V. Dvuhurovnevaya nejrosetevaya model' deshifatora elektromiosignala v sisteme upravleniya vertikalizaciej ekzoskeleta [A two-level neural network model of an electromyosignal decoder in an exoskeleton verticalization control system]. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2020, no. 4 (52), pp. 99–111.

11. Trifonov A. A., Kuzmin A. A., Filist S. A. Biotechnical System for Control to the Exoskeleton Limb Based on Surface Myosignals for Rehabilitation Complexes. *IEEE 14th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*. Tashkent, Uzbekistan, 2020. <https://doi.org/10.1109/AICT50176.2020.9368588>

12. Trifonov A. A., Petrunina E. V., Filist S. A., Kuzmin A. A., Zhilin V. V. Biotehnicheskaya sistema s virtual'noj real'nost'yu v reabilitacionnyh kompleksah s iskusstvennymi obratnymi svyazyami [Biotechnical system with virtual reality in rehabilitation complexes with artificial feedback]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, vol. 9, no. 4, pp. 46–66.

13. Myasnyankin M. B., Kuzmin A. A., Filist S. A. Neural network classifiers with descriptors obtained on the basis of analysis of the system rhythms in intellectual prediction systems for non-hospital pneumonia. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, no. 1801, p. 012046. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1801/1/012046>

14. Koryak Yu. A. Nejromyshechnye izmeneniya pod vliyaniem semisutochnoj mekhanicheskoy razgruzki myshechnogo apparata cheloveka [Neuromuscular changes under the influence of seven-day mechanical unloading of the human muscular apparatus]. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2008, no. 9, pp. 8–21.

15. Filist S. A., Tomakova R. A., Yaa Zar Do. Universal'nye setevye modeli dlya zadach klassifikacii biomedicinskih dannyh [Universal network models for classification tasks of biomedical data]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4-2(43), pp. 44–50.

16. Al-Bareda A. Ya. S., Tomakova R. A., Brezhneva A. N. Algoritmy sinteza optimal'nogo upravleniya v biotehnicheskikh sistemah reabilitacionnogo tipa na os-nove tekhnologii nejronnyh setej [Algorithms for the synthesis of optimal control in biotechnical rehabilitation-type systems based on neural network technology]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biotehnicheskikh sistemah = System Analysis and Management in Biotechnical Systems*, 2018, vol. 17, no. 3, pp. 718–725.

17. Filist S. A., Myasnyankin M. B., Safronov R. I., Kuzmin A. A. Multimodal neural network classifier of the functional state of the respiratory system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, no. 2094, p. 03264. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2094/3/032064>

18. Filist S., Riad Taha Al-Kasasbeh, Shatalova O. V., Mohammad Hjoui Btoush, Manafaddin Namazov, Ashraf Adel Shaqadan, Mahdi Alshamasin, Korenevskiy N., Saleh Aloqeili, Myasnyankin M. B. Biotechnical neural network system for predicting cardiovascular health state using processing of bio-signals. *International Journal of Medical Engineering and Informatics*, 2021, no. 1(1), p. 1. <https://doi.org/10.1504/IJMEI.2022.10047451>

19. Tomakova R. A., Filist S. A., Nasser A. A. Nechetkie nejrosetevye tekhnologii dlya vydeleniya segmentov s patologicheskimi obrazovaniyami i morfologicheskimi strukturami na medicinskih izobrazheniyah [Fuzzy neural network technologies for the allocation of segments with pathological formations and morphological structures in medical images]. *Biomedicinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2012, no. 4, pp. 43–49.

20. Tomakova R. A., Tomakov M. V., Durakov I. V., Zhilin V. V. Metod klassifikacii rentgenogramm na osnove ispol'zovaniya global'noj informacii [Method of classification of radiographs based on the use of global information]. *Biomedicinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2016, no. 94 (11), pp. 45–51.

Информация об авторах / Information about the Authors

Кузьмин Александр Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Ku3bmin@gmail.com

Alexander A. Kuzmin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Computer Science, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: Ku3bmin@gmail.com

Томакова Римма Александровна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация e-mail: rtomakova@mail.ru, Researcher ID: O-6164-2015, ORCID: 0000-0003-152-4714

Rimma A. Tomakova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: rtomakova@mail.ru, Researcher ID: O-6164-2015, ORCID: 0000-0003-152-4714

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

Elena V. Petrunina, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of SMART Technologies, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, e-mail: isu@mospolytech.ru

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

Dmitry A. Ermakov, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dmitriyermakov98@yandex.r

Кадырова София, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: SFilist@gmail.com

Sofia Kadyrova, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: SFilist@gmail.com

Количественная оценка защитных механизмов организма по энергетическому разбалансу меридианных структур

Н. А. Корневский¹, Л. В. Шульга¹, С. Н. Родионова¹✉,
К. В. Разумова¹, А. Ю. Рыбаков¹

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

✉ e-mail: knsofia@mail.ru

Резюме

Цель исследования – повышение качества прогнозирования и диагностики заболеваний, вызываемых действием разнородных факторов риска, за счет использования оценочных характеристик уровня защиты организма, определяемых по энергетическим характеристикам биологически активных точек, составляющих основу соответствующих меридианных структур.

Методы. Исследуются вопросы использования показателей, характеризующих энергетические характеристики меридианных структур для количественной оценки уровня защиты организма от воздействия множества разнородных факторов внешней среды. Поскольку исследуемые показатели имеют выраженную нечеткую природу, в качестве базового математического аппарата выбрана методология синтеза гибридных нечетких решающих правил.

Результаты. В работе показано, что для количественной оценки уровня защиты организма на различных его уровнях (организм, система, орган) в качестве энергетических характеристик меридианных структур целесообразно использовать разбаланс электрического сопротивления соответствующих биологически активных точек от своих номинальных значений, определяемый в нормальных условиях и после дозированной нагрузки. Предложен метод оценки уровня защиты по энергетическому разбалансу меридианных структур организма, отличающийся тем, что в качестве базовых переменных функций уровня защиты (ФУЗ) используется энергетический разбаланс меридианных структур для выбранного уровня исследования в сочетании с нагрузочным энергетическим разбалансом, позволяющий оценивать уровень защиты организма в целом, а также его систем и органов с приемлемой для медицинской практики точностью. Показаны пути встраивания ФУЗ в прогностические и диагностические решающие правила.

Заключение. В ходе проведенных исследований было показано, что для улучшения показателей качества прогнозирования и диагностики социально значимых и профессиональных заболеваний целесообразно использовать показатели уровня защиты организма определяемые по энергетическому разбалансу меридианных структур. Показано, что качество принятия решений с использованием ФУЗ увеличивается на 10–20% в зависимости от типа решаемых задач и полноты собираемых данных по сравнению с традиционно получаемыми моделями.

Ключевые слова: меридианные структуры; энергетический разбаланс; биологически активные точки; функции уровня защиты; уровень защиты организма; нечеткие решающие правила.

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

Для цитирования: Количественная оценка защитных механизмов организма по энергетическому разбалансу меридианных структур / Н. А. Кореневский, Л. В. Шульга, С. Н. Родионова, К. В. Разумова, А. Ю. Рыбаков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 3. С. 82–101. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-82-101>.

Поступила в редакцию 20.07.2023

Подписана в печать 17.08.2023

Опубликована 29.09.2023

Quantitative Assessment of the Body's Defense Mechanisms by the Energy Imbalance of Meridian Structures

Nikolai A. Korenevsky¹, Leonid V. Shulga¹, Sofia N. Rodionova¹✉,
Ksenia V. Razumova¹, Anton Y. Rybakov¹

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

✉ e-mail: knsofia@mail.ru

Abstract

The purpose of research is to improve the quality of predicting and diagnosing diseases caused by the action of heterogeneous risk factors by using the estimated characteristics of the body's protection level, determined by the energy characteristics of biologically active points that form the basis of the corresponding meridian structures.

Methods. Explores the issues of using indicators characterizing the energy characteristics of meridian structures for a quantitative assessment of the level of protection of the body from the effects of many diverse environmental factors. Since the indicators under study have a pronounced fuzzy nature, the methodology for synthesizing hybrid fuzzy decision rules was chosen as the basic mathematical apparatus.

Results. The paper shows that for a quantitative assessment of the level of protection of the body at its various levels (organism, system, organ), it is advisable to use the imbalance of the electrical resistance of the corresponding biologically active points from their nominal values, determined under normal conditions and after a dosed load, as the energy characteristics of the meridian structures. A method for assessing the level of protection by the energy imbalance of the meridian structures of the body is proposed, which differs in that the energy imbalance of the meridian structures for the selected level of research in combination with the load energy imbalance is used as the basic variable functions of the protection level (PLF), which allows assessing the level of protection of the body as a whole, as well as its systems and organs with an accuracy acceptable for medical practice. The ways of embedding FUS in predictive and diagnostic decision rules are shown.

Conclusion. *In the course of the studies, it was shown that in order to improve the quality indicators of forecasting and diagnosing socially significant and occupational diseases, it is advisable to use indicators of the level of body protection determined by the energy imbalance of meridian structures. It is shown that the quality of decision-making with the use of FLS increases by 10–20% depending on the type of tasks being solved and the completeness of the collected data compared to traditionally obtained models.*

Keywords: *meridian structures; energy imbalance; biologically active points; protection level functions; the level of protection of the body; fuzzy decision rules.*

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

For citation: Korenevsky N. A., Shulga L. V., Rodionova S. N., Razumova K. V., Rybakov A. Y. Information Support for Decision-Making According to the Assessment of Fire-Fighting Distances from the Borders of Open Areas for PBX Storage. *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*. 2023; 13(3): 82–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-82-101>.

Received 20.07.2023

Accepted 17.08.2023

Published 29.09.2023

Введение

Одним из фундаментальных свойств живого организма является его способность в ответ на многообразные воздействия окружающей среды включать сложнейшие механизмы адаптации, способные в определенных пределах обеспечивать нормальное функционирование живой системы, защищая человеческий организм от перехода из состояния здоровья в состояние болезни [1; 2; 3; 4; 5]. С учетом того, что защитная система организма имеет сложную недостаточно изученную структуру динамического типа, вопросы количественной оценки индивидуальной меры защиты организма от разнородных факторов риска в современной медицинской литературе изучены недостаточно. Имеется достаточно ограниченный круг работ,

посвященных вопросам количественной оценки уровня защиты организма в основном на общесистемном уровне [6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13]. По данным литературы наиболее «тесно» с защитными функциями организма связаны такие понятия, как адаптационный потенциал, адаптационный резерв, функциональное состояние и функциональный резерв, причем количественно эти показатели преимущественно используют в моделях оценки уровня защиты всего организма¹. В то же время значительный практический интерес представляет собой оценка уровня защиты отдельных органов и систем, особенно если они являются мишенями, например, для производственных факторов риска. В работах [7; 11; 12] показано, что для оценки уровня защиты организма (УЗО) на различных его уровнях (организм, система,

¹ Крикунова Е. В. Методы и средства прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы с учетом защитных

механизмов организма: дис. ... канд. техн. наук. Курск, 2023. 152 с.

орган, имеющие представительство на меридианных структурах) могут быть использованы энергетические характеристики биологически активных точек (БАТ). В качестве обоснования применимости энергетических характеристик БАТ для оценки УЗО на различных уровнях организма можно привести следующие соображения. Хотя с позиций современной адаптологии БАТ не являются составной частью защитной системы организма, однако эти точки активно участвуют в энергоинформационных процессах, которые неразрывно связаны с реализацией адаптационных механизмов, а, следовательно, их состояние может быть использовано для косвенной оценки уровня защиты организма и его составных частей.

Материалы и методы

Теоретической базой применения энергетических характеристик БАТ для оценки уровня защиты организма и его систем является теория биофизики акупунктуры, описанная в работах [14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23]. В работах [6; 7; 11; 12] описаны варианты оценки уровня защиты организма в целом по величине энергетического разбаланса (ЭР) биологически активных точек. В этих моделях уровень защиты организма определялся по величине разбаланса электрического сопротивления общесистемных БАТ в соответствии с выражением

$$\begin{aligned} &\text{ЕСЛИ } [(\delta R_{E23} > 20\%) \text{ И } (\delta R_{V60} > 20\%)], \\ &\text{ТО } [\mathcal{E}P(q+1) = \mathcal{E}P(q) + \mu_{\mathcal{E}P}(\delta R_{j+1})], \quad (1) \\ &\text{ИНАЧЕ } (\mathcal{E}P = 0), \end{aligned}$$

где $\mu_{\mathcal{E}P}(\delta R_{j+1})$ – функция принадлежности, характеризующая уровень энергетического разбаланса по точке $j+1$; $\delta R_2 = \delta R_{E36}$; $\delta R_3 = \delta R_{RP6}$; $\delta R_4 = \delta R_{V40}$; $\delta R_5 = \delta R_{V60}$; $\delta R_6 = \delta R_{VB20}$; $\mathcal{E}P(1) = \mu_{\mathcal{E}P}(\delta R_{E23})$.

Уровень защиты определяется для области значений $[0, \dots, 1]$ как функциональная зависимость от величины энергетического разбаланса. Например, в работе [11] приводится модель оценки УЗО вида

$$UZ_{\mathcal{E}P} = \begin{cases} 0,4, & \text{если } \mathcal{E}P < 0,2, \\ -0,5\mathcal{E}P + 0,5, & \text{если } 0,2 \leq \mathcal{E}P < 0,8, \\ 0,1, & \text{если } \mathcal{E}P \geq 0,8. \end{cases} \quad (2)$$

Модели (1) и (2) были получены экспертами методом Дельфы и требуют проверки путем их сопоставления с различными классами состояний организма человека (относительно здоровые люди, состояния с высоким риском появления и развития заболеваний, донозологические и преморбидные состояния, заболевания с различной степенью тяжести и др.), которые определяются с использованием внешних по отношению к характеристикам БАТ критериев [6; 11].

Для проверки предположения о целесообразности использования энергетических характеристик БАТ при оценке УЗО с дальнейшим их использованием в прогностических и диагностических моделях была сформирована группа экспертов из восьми человек, перед которой была поставлена задача – оценить возможность использования данных о разбалансе электрических сопротивлений общесистемных БАТ в сравнении с общепринятыми в адаптологии показателями, такими как: показатель активно-

сти регуляторных систем по Р. М. Баевскому (ПАРС); показатель характеризующий адаптационный потенциал системы кровообращения (АП); показатель, характеризующий иммунно-эндокринную составляющую адаптации по Л. Х. Гаркави (ИЭСА); показатель, характеризующий нервно-психическую составляющую адаптации (НПСА) по шкале И. Н. Гурвича; перекисное окисление липидов (ПОЛ); антиокислительная активность (АОА). Этот набор показателей в современной литературе ассоциируется с защитными механизмами организма.

Для решения этой задачи на основе анализа состояния здоровья студентов кафедры биомедицинской инженерии и истории болезни пациентов, наблюдавшихся в Клиническом научно-медицинском центре «Авиценна» г. Курска, была отобрана группа из 60 человек, в состав которой входили люди, считающие себя здоровыми, люди, склонные к заболеваниям нервной и иммунной систем, сердечно-сосудистой системы и системы дыхания. Текущее состояние этих людей определялось с использованием моделей прогнозирования, ранней и дифференциальной диагностики, приведенные в

работах [6; 24]. По каждому из обследуемых определялись показатели ПАРС, АП, ИЭСА, НПСА, ПОЛ, АОА и ЭР. Эксперты, зная состояние здоровья и значения измеряемых показателей по методу Дельфы, выставляли согласованные баллы (от 0 до 10), отражающие уверенность в том, что эти показатели целесообразно применять для оценки УЗО. В результате оценивания была получена таблица экспериментальных данных показателей, характеризующих экспертное заключение о целесообразности использования исследуемых показателей для расчета УЗО.

Для объективизации полученных оценок проводилась проверка информативности анализируемых показателей по отношению к латентной переменной УЗО с использованием теории измерений латентных переменных, реализуемой интерактивным пакетом RUMM 2020.

Порядок подготовки данных и интерпретация их обработки пакетом RUMM 2020 описаны в работах [25; 26; 27; 28]. Результат обработки с ранжированием индикаторных по значениям *ChiSq Prob* приведен ниже (табл. 1).

Таблица 1. Ранжирование индикаторов по значениям *ChiSq Prob*

Table 1. Ranking of indicators by values *ChiSq Prob*

Индикаторные переменные	Location	SE	ChiSq Prob
ПАРС	0,352	0,201	0,903
НПСА	0,031	0,311	0,856
ПОЛ	-0,122	0,209	0,733
ЭР	0,312	0,510	0,675
АОА	-0,253	0,411	0,521
АП	-0,476	0,308	0,321
ИЭСА	0,701	0,453	0,065

По результатам обработки было установлено, что показатель ЭР по степени его соответствия модели Г. Раша превышает показатели АОА, АП и ИЭСА, а соответственно может быть использован для оценки УЗО наряду с принятыми и признанными в адаптологии показателями.

Анализ литературы и собственные исследования показали, что для синтеза решающих правил оценки уровня защиты по электрическому сопротивлению БАТ необходимо придерживаться ряда важных практических рекомендаций, касающихся процедуры и режимов измерений. Так измерение сопротивления следует производить на переменном токе с частотой 1 кГц при силе тока до 10 мкА. Следует учитывать, что получаемые значения сопротивлений зависят не только от состояния организма, но и от способов наложения электродов, от их площади, условий контакта с кожей, местоположения БАТ на теле человека и множества других параметров. Поэтому при измерении номинальных и текущих значений сопротивлений БАТ необходимо обеспечивать сопоставимость всех измерительных процедур, рекомендации по обеспечению которых приведены в работах [14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23].

В работах [6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13] было показано, что для решения задач прогнозирования, ранней и дифференциальной диагностики различных классов заболеваний, использующих в качестве одного из ведущих информативных

показателей УЗО, включая уровни защиты организма, определяемые по энергетическим характеристикам БАТ, целесообразно использовать методы нечеткой логики принятия решений, и в частности, методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), разработанную в Юго-Западном государственном университете [29; 30; 31; 32; 33; 34; 35].

Результаты и их обсуждение

Проведенные нами исследования показали, что для синтеза моделей оценки уровня защиты на общесистемном, системном и органном уровнях по величинам энергетического разбаланса соответствующих групп БАТ с последующим их «встраиванием» в прогностические и диагностические модели, обеспечивая требуемые качества принятия решений, необходимо учитывать особенности циркуляции энергии и информации по меридианным структурам организма. Анализ взаимосвязи энергетических характеристик БАТ с функциональным состоянием и состоянием здоровья сопряженных органов и систем позволил разработать метод оценки защитных механизмов организма по энергетическому разбалансу меридианных структур, определяемый следующей последовательностью действий:

1. С учетом общих рекомендаций по синтезу моделей принятия решений по параметрам электрических сопротивлений БАТ выбираются технические средства, режимы и способы измерений

электрических характеристик (ЭХ) БАТ и метод определения их номинальных значений.

2. Выбирается уровень исследований: организм в целом, системы, подсистемы и органы, обозначаемые идентификатором s (организм в целом, система (сердечно-сосудистая, дыхания, желудочно-кишечный тракт и т. д.), орган (сердце, печень, легкое и т. д.)).

3. При решении задачи оценки уровня защиты по органам, имеющим представительство на точках, описанных в известных атласах меридиан, по этим атласам определяются списки точек, имеющих связь с искомой патологией, по которым определяются списки диагностически значимых точек (ДЗТ), списки информативных точек и осуществляется синтез комбинированной нечеткой модели определения уровня энергетического разбаланса ER_s с использованием выражения

$$\begin{aligned} &\text{ЕСЛИ} \left[\left(\delta R_{Y_1}^D > \delta R^\Pi \right) \right. \\ &\text{И} \left(\delta R_{Y_1}^D > \delta R^\Pi \right), \dots, \\ &\left. \left(\delta R_{Y_{ms}}^D > \delta R^\Pi \right) \right], \\ &\text{ТО} \left[ER_s = F_E(EY_{sj}) \right], \\ &\text{ИНАЧЕ} \left(ER_s = 0 \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где ER_s – электрический разбаланс по множеству точек, выбранных из атласов меридиан под конкретную ситуацию s (в зависимости от решаемых задач – весь организм, система, орган, заболевание, синдром и др.); EY_{sj} – энергетический разбаланс БАТ с именем Y_{sj} , выбранной

как информативная по отношению к уровню защиты, состоянию здоровья или к функциональному состоянию; $\delta R_{Y_j}^D$ – величина относительного отклонения сопротивления R_{Y_j} из списка диагностически значимых точек (ДЗТ) от своего номинального значения для БАТ с идентификатором Y_j ; δR^Π – пороговое значение отклонений БАТ от номинального значения.

Алгоритмы определения списков ДЗТ и информативных БАТ описаны в работах [15; 16; 17].

При использовании выражения (3) следует иметь в виду, что отклонения сопротивлений БАТ от номинальных значений в положительную и отрицательную сторону несут различную прогностическую и диагностическую информацию, а следовательно, знак отклонения должен учитываться при синтезе соответствующих функций уровня защиты (ФУЗО). В то же время в части решающих правил являющихся условием проверки выбранной гипотезы (часть ЕСЛИ ..., ТО...) знак отклонения не имеет существенного значения.

Такой учет обеспечивается тем, что $\delta R_{Y_j}^D$ может быть определено по формуле

$$\delta R_{Y_j}^D = \frac{|R_{H_j} - R_{T_j}|}{R_H}. \quad (4)$$

При определении энергетического разбаланса EY_{sj} БАТ с именем Y_{sj} следует использовать выражение вида

$$\delta R_{sj} = \frac{R_{T_j} - R_{H_j}}{R_H}. \quad (5)$$

Проведенные нами исследования показали, что выбор функций агрегации определяется типом решаемых задач в соответствии с общими рекомендациями МСГНРП, например путем расчета среднего значения составляющих EY_{sj} :

$$ER_s = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J EY_j. \quad (6)$$

Методы и алгоритмы определения параметров выражения (2) описаны в работах [15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23].

4. Показатель уровня энергетического разбаланса ER_s определяется как аргумент (базовая переменная) для функций уровня защиты органа s . С учетом нечеткой природы функций уровня защиты (ФУЗ) для количественной оценки уровня защиты организма вводится характеристическая функция уровня защиты с областью значений на интервале $[0, \dots, 1]$. Нулевому значению ФУЗ соответствует слом функций защиты на исследуемом уровне организма (орган, система, организм в целом), приводящей к гибели без внешней помощи, направленной на коррекцию этой функции. Единичному значению ФУЗ соответствует такое состояние функции защиты, которое позволяет сохранить работоспособность исследуемого уровня организма с требуемым качеством при условии, что внешние воздействия не превышают пределов, не совместимых с жизнью. В качестве ФУЗ может быть, например, использована классическая

функция принадлежности для лингвистической переменной превосходный (отличный) уровень защиты. В качестве количественной меры УЗО в работе определена способность организма сопротивляться появлению и развитию заболеваний на различных уровнях организма. Выбранное определение сопоставляет уровень защиты организма с состоянием здоровья и его девиациями под воздействием разнообразных экзогенных и эндогенных факторов. С учетом этого при оценке уровня защиты организма по его энергетическому разбалансу ER_s выбрано сопоставление значений ER_s с различными классами состояний организма человека (относительно здоровые люди, состояния с высоким риском появления и развития заболеваний, донозологические и преморбидные состояния, заболевания с различной степенью тяжести и др.), которые определяются с использованием внешних по отношению к энергетическим характеристикам БАТ критериев, например модели прогнозирования, ранней и дифференциальной диагностики с доказанной точностью принятия решений и др. Для известных классов состояния здоровья на экспертном уровне производится установление соответствия между уровнем защиты и состоянием здоровья с фиксацией соответствующих значений ER_s или их интервалов, являющихся аргументами для построения соответствующих функций уровней защиты $f_{Z_s}(ER_s)$.

5. Анализ литературы и собственные исследования показывают, что точность оценки уровня защиты повышается, если наряду с измерением текущего значения ER_s измерять величину энергетического разбаланса после выполнения стандартных нагрузок аналогично тому, как это делается при определении адаптационного и функционального резерва. Для определения уровня защиты по нагрузочной пробе, как и в варианте оценки адаптационного резерва, предлагается использовать два показателя: EN – отношение величины ER до воздействия нагрузкой $ER(0)$ и после воздействия $ER(N)$ и скорость EV восстановления ER за время наблюдения: $T_{НБ} - EV = [ER(0) - ER(N)]/T_{НБ}$. В условиях нечеткой парадигмы определяются две частные функции уровня нагрузочного энергетического разбаланса: $f_{ER}(EN)$ и $f_{ER}(EV)$ с базовыми переменными EN и EV .

Нагрузочный энергетический разбаланс ERN_s для анализируемого показателя ER_s определяется агрегацией частных функций уровня энергетического разбаланса в соответствии с общими рекомендациями МСГНПП. Например, если показатели EN и EV дополняя «усиливают» друг друга, то нагрузочный энергетический разбаланс определяется выражением

$$ERN_s = f_{ER}(EN) + f_{ER}(EV) - f_{ER}(EN) \cdot f_{ER}(EV). \quad (7)$$

В более общем случае выражение (7) имеет вид

$$ERN_s = AGE[f_{ER}(EN), f_{ER}(EV)]. \quad (8)$$

Используя показатели (8) как базовые переменные, определяют функции уровня защиты по нагрузочной пробе $f_{zs}(ERN_s)$.

Интегральная оценка уровня защиты организма, его систем и органов определяется агрегацией соответствующих пар уровней защиты:

$$UZE_s = AG_{UE}[f_{zs}(ER_s), f_{zs}(ERN_s)]. \quad (9)$$

Показатели нагрузочного энергетического разбаланса и интегральная оценка уровня защиты организма так же, как и показатель ER_s , используется для построения соответствующих ФУЗ.

6. Если решается задача оценки уровня защиты по энергетическим характеристикам БАТ (ЭХ БАТ) на системном уровне, то для выбранной системы s , руководствуясь рекомендациями биофизики акупунктуры, с учетом специфики решаемых задач выбирается система точек, характеризующих энергетическое состояние искомой системы с точки зрения биофизики акупунктуры (начальные и конечные точки меридиан по Фоллю, точки тревоги, точки-пособники по А. И. Нечушкину, ЛО-пункты, пары сигнальных и сочувственных точек и др.). По выбранной системе точек определяется энергетический разбаланс каждой из них с последующей агрегацией в энергетический разбаланс выбранной системы с использованием модели аналогичной (3). При наличии медико-технических возможностей синтезируются модели, аналогичные (8) и (9).

7. Если решается задача оценки уровня защиты по энергетическим характеристикам БАТ (ЭХ БАТ) для организма в целом (на общесистемном уровне), руководствуясь рекомендациями биофизики акупунктуры, с учетом специфики решаемых задач выбирается способ вычисления энергетического разбаланса на общесистемном уровне. Если выбираются общесистемные БАТ, осуществляется синтез модели типа (1) и при наличии медико-технических возможностей синтезируются модели, аналогичные (8) и (9). Если выбран механизм оценки энергетического разбаланса на общесистемном уровне по энергетическому разбалансу отдельных меридиан, то выполняется пункт 5 с последующим построением объединенной модели путем агрегации всех системных составляющих.

Полученные показатели УЗО в соответствии с общими рекомендациями МСГНРП встраиваются в более общие прогностические и диагностические модели. В работах [6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13;

14] описаны различные типы моделей такого встраивания в зависимости от типов решаемых задач.

Выводы

В ходе проведенных исследований было показано, что для улучшения показателей качества прогнозирования и диагностики социально значимых и профессиональных заболеваний целесообразно использовать показатели уровня защиты организма, определяемые по энергетическому разбалансу меридианых структур.

В результате экспертного оценивания и математического моделирования было показано, что качество принятия решений с использованием предложенных моделей увеличивается на 10–20% в зависимости от типа решаемых задач по сравнению с моделями, не использующими показатели уровня защиты организма, что позволяет рекомендовать полученные результаты к практическому использованию в системе здравоохранения.

Список литературы

1. Лопатина А. Б. Неспецифические механизмы защиты и адаптационные реакции организма // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 10-3. С. 467–469.
2. Берестенева О. Г., Уразаев А. М., Шелехов И. Л. Основные этапы процесса индивидуальной адаптации // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6.
3. Кузьмина В. Е., Беляков В. И. Основы адаптологии. 2-е изд. Самара: Самарский университет, 2013. 236 с.
4. Баевский Р. М., Берсенева А. П. Оценка адаптационных возможностей организма и риска заболеваний. М.: Медицина, 1997. 128 с.
5. Казначеев В. П., Баевский Р. М., Берсенева А. П. Донозологическая диагностика в практике массовых обследований населения. М.: Медицина, 1980. 208 с.

6. Контроль динамики развития ишемических процессов в сердце по энергетическому разбалансу меридианных структур организма / Н. А. Корневский, И. Ю. Григоров, К. В. Разумова, В. А. Горбунов, В. В. Дмитриева, С. В. Дегтярев // Медицинская техника. 2020. № 1 (319). С. 47–49.

7. Оценка и управление состояния 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.

8. Крикунова Е. В., Сафронов Р. И., Кадырова С. Математические модели оценки уровня защиты центральной нервной системы // Актуальные проблемы медицинской науки и образования (АПМНО – 2022): сборник статей по материалам VIII Международной научной конференции. Пенза: Пензенский государственный университет, 2022. С. 131–135.

9. Крикунова Е. В., Сафронов Р. И. Метод синтеза гибридных нечетких решающих правил прогнозирования и ранней диагностики с учетом защитных свойств организма // Медико-экологические информационные технологии – 2022: сборник научных статей по материалам XXV Международной научно-технической конференции / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2022. С. 109–113.

10. Количественная оценка защитных механизмов организма по его оксидантному статусу / Н. А. Корневский, С. Н. Родионова, Е. В. Крикунова, Л. В. Стародубцева, М. В. Скиданчук // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 4. С. 146–162.

11. Использование показателей, характеризующих адаптационные механизмы, для оценки уровня защиты организма от воздействия внешних факторов риска / Р. И. Сафронов, С. Н. Родионова, Е. В. Крикунова, Л. В. Стародубцева, С. С. Сергеева, А. В. Титова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 4. С. 163–179.

12. Методы количественной оценки защитных механизмов организма на различных его уровнях на основе гибридных нечетких моделей и их использование в задачах прогнозирования и медицинской диагностики / Н. А. Корневский, С. Н. Родионова, Е. В. Крикунова, Р. И. Сафронов, В. А. Белозеров // Медицинская техника. 2022. № 3 (333). С. 24–27.

13. Метод определения уровня защиты организма по его оксидантному статусу в задачах оценки влияния производственных факторов риска на состояние здоровья /

Н. А. Кореневский, С. Н. Родионова, Л. В. Стародубцева, Н. А. Милостная, Е. Н. Кореневская // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2022. Т. 21, № 3. С. 75–89.

14. Developing a biotech scheme using fuzzy logic model to predict occurrence of diseases using person's functional state / R. Al-Kasasbeh, N. Korenevskiy, A. A. Aikeyeva, A. A. Shaqadan, I. Maksim // International Journal of Computer Applications in Technology. 2020. Vol. 62, N 3. P. 257–267.

15. Кореневский Н. А., Крупчатников Р. А., Аль-Касасбех Р. Т. Теоретические основы биофизики акупунктуры с приложениями в медицине, психологии и экологии на основе нечетких сетевых моделей: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2020. 528 с.

16. Bioengineering system for prediction and early prenosological diagnostics of stomach diseases based on energy characteristics of bioactive points with fuzzy logic / R. T. Al-Kasasbeh, N. Korenevskiy, M. Alshamasin, D. Klionskiy // Biosensors and Bioelectronics. 2015. Vol. 6, N 4. P. 1–9.

17. Кореневский Н. А., Крупчатников Р. А. Информационно-интеллектуальные системы для врачей рефлексотерапевтов: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 424 с.

18. Numerical software algorithms for monitoring control processes and correcting health by synthesis of hybrid fuzzy rules of decision-making on the basis of changes in energetic characteristics of biologically active points / R. T. Al-Kasasbeh, N. Korenevskiy, M. S. Alshamasin, D. Klionskiy, F. Ionescu // International Journal of Modelling, Identification and Control. 2016. Vol. 25, N 2. P. 119–137.

19. Application of fuzzy analysis with the energy condition of bioactive points to the prediction and diagnosis of gastrointestinal tract diseases / R. T. Al-Kasasbeh, N. A. Korenevskiy, F. Ionescu, M. Alshamasin, A. P. Smith, A. Alwadie, S. Aljbour // International Journal of Biomedical Engineering and Technology. 2013. Vol. 11, N 2. P. 136–154.

20. A biotech measurement software system using controlled features for determining the level of psycho-emotional tension on man-machine system operators by bio-active points based on fuzzy logic measures / R. T. Al-Kasasbeh, M. A. A. Zaubi, N. Korenevskiy, F. Al-Shawawreh, M. S. Alshamasin, F. Ionescu // International Journal of Modelling, Identification and Control. 2014. Vol. 22, N 4. P. 375–395.

21. Bioengineering system for prediction and early prenosological diagnostics of stomach diseases based on energy characteristics of bioactive points with fuzzy logic / R. T. Al-Kasasbeh, N. Korenevskiy, M. Alshamasin, D. Klionskiy // Biosensors and Bioelectronics. 2015. Vol. 6, N 4. P. 1–9. <https://doi.org/10.4172/2155-6210.1000182>

22. Сафронов Р. И., Стародубцева Л. В., Крикунова Е. В. Перспективы применения мягких вычислений и информационных технологий в профпатологии: монография.

Курск: Издательство Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2018. 232 с.

23. Шкатова Е. С., Магеровский М. А., Мухатиев Ю. Б. Оценка функционального состояния и функционального резерва организма по энергетической сбалансированности меридианных структур // Современные тенденции развития техники и технологии: сборник научных трудов по материалам VIII Международной научно-практической конференции. Белгород: ИП Ткачева Е. П., 2015. С. 132–135.

24. An Expert System for Predicting and Diagnosing Occupational Diseases of Electric Power Industry Workers / N. A. Korenevskiy, L. V. Shulga, E. V. Krikunova, R. I. Safronov, G. V. Siplivy // Biomedical Engineering. 2022. Vol. 55, N 6. P. 437–441. <https://doi.org/10.1007/s10527-022-10154-x>.

25. Оценка и управление состоянием здоровья на основе моделей Г. Раша / Н. А. Корневский, А. Н. Шуткин, Е. А. Бойцова, В. В. Дмитриева // Медицинская техника. 2015. № 6 (294). С. 37–40.

26. Шуткин А. Н. Оценка уровня психоэмоционального напряжения на основе комбинированных нечетких моделей и модели Г. Раша // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2014. Т. 14, № 3. С. 593–600.

27. Оценка функционального состояния здоровья человека с использованием теории измерения латентных переменных на основе моделей Г. Раша / А. Н. Шуткин, Е. А. Бойцова, С. Н. Корневская, В. Я. Провоторов // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2014. Т. 13, № 4. С. 927–932.

28. Бойцов А. В. Использование латентных переменных для оценки усталости человека // Медико-экологические информационные технологии – 2014: сборник материалов XVII Международной научно-технической конференции / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2014. С. 116–122.

29. Использование теории измерений латентных переменных с моделью Г. Раша для оптимизации схем лечебно-оздоровительных мероприятий / Н. А. Корневский, А. В. Бойцов, М. И. Лукашов, И. А. Ключиков // Научный взгляд на современный этап развития общественных, технических, гуманитарных и естественных наук. Актуальные проблемы: сборник научных статей по итогам Всероссийской научно-практической конференции. СПб., 2014. С. 70–72.

30. Корневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1 (289). С. 33–35.

31. 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: Издательство Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2016. 224 с.

32. Кореневский 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.

33. Прогнозирование и ранняя диагностика профессиональных заболеваний в электроэнергетике на основе методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил: монография / В. И. Серебровский, М. А. Мясоедова, В. В. Серебровский [и др.]. Курск: Издательство Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2019. 285 с.

34. Кореневский Н. А., Башир А. С., Горбатенко С. А. Синтез гибридных нечетких правил для прогнозирования, оценки и управления состоянием здоровья в экологически неблагоприятных регионах // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 4. С. 69–73.

35. Быков А. В., Кореневский Н. А., Устинов А. Г. Нечеткий алгоритм прогноза развития ишемической болезни конечностей для различных этапов ведения пациентов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2016. № 2 (19). С. 142–155.

References

1. Lopatina A. B. Nespecificheskie mekhanizmy zashchity i adaptacionnye reakcii organizma [Nonspecific defense mechanisms and adaptive reactions of the body]. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij = International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2013, no. 10-3, pp. 467–469.

2. Beresteneva O. G., Urazaev A. M., Shelekhov I. L. Osnovnye etapy processa individual'noj adaptacii [The main stages of the process of individual adaptation]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, 2013, no. 6.

3. Kuz'mina V. E., Belyakov V. I. Osnovy adaptologii [Fundamentals of adaptology]. 2nded. Samara, Samara University Publ., 2013. 236 p.

4. Baevskij R. M., Berseneva A. P. Ocenka adaptacionnyh vozmozhnostej organizma i riska zabolevanij [Evaluation of the adaptive capacity of the organism and the risk of diseases]. Moscow, Medicina Publ., 1997. 128 p.

5. Kaznacheev V. P., Baevskij R. M., Berseneva A. P. Donozologicheskaya diagnostika v praktike massovyh obsledovanij naseleniya [Prenosological diagnostics in the practice of mass surveys of the population]. Moscow, Medicina Publ., 1980. 208 p.

6. Korenevskij N. A., Grigorov I. Yu., Razumova K. V., Gorbunov V. A., Dmitrieva V. V., Degtyarev S. V. Kontrol' dinamiki razvitiya ishemicheskikh processov v serdce po energeticheskomu razbalansu meridiannyh struktur organizma [Control of the dynamics of development of ischemic processes in the heart according to the energy imbalance of the meridian structures of the body]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Technique*, 2020, no. 1 (319), pp. 47–49.

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

8. Krikunova E. V., Safronov R. I., Kadyrova S. [Mathematical models for assessing the level of protection of the central nervous system]. *Aktual'nye problemy medicinskoj nauki i obrazovaniya (APMNO – 2022). Sbornik statej po materialam VIII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii* [Actual problems of medical science and education (APMNO – 2022). Collection of articles based on the materials of the VIII International Scientific Conference]. Penza, Penza State University Publ., 2022, pp. 131–135. (In Russ.)

9. Krikunova E. V., Safronov R. I. [Method for the synthesis of hybrid fuzzy decision rules for forecasting and early diagnosis taking into account the protective properties of the organism]. *Mediko-ekologicheskie informacionnye tekhnologii – 2022. Sbornik nauchnyh statej po materialam XV Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Medical and environmental information Technologies – 2022. Collection of scientific articles based on the materials of the XV International Scientific and Technical Conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2022, pp. 109–113. (In Russ.)

10. Korenevskij N. A., Rodionova S. N., Krikunova E. V., Starodubceva L. V., Skidanchuk M. V. Kolichestvennaya ocenka zashchitnyh mekhanizmov organizma po ego oksidantnomu statusu [Quantitative assessment of the body's defense mechanisms according to its oxidative status]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universitetyu. Seriya: Upravlenie, vychis-litel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 146–162.

11. Safronov R. I., Rodionova S. N., Krikunova E. V., Starodubceva L. V., Sergeeva S. S., Titova A. V. Ispol'zovanie pokazatelej, harakterizuyushchih adaptacionnye mekhanizmy, dlya ocenki urovnya zashchity organizma ot vozdejstviya vneshnih faktorov riska [The use of indicators characterizing adaptive mechanisms to assess the level of protection of the body from the impact of external risk factors]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universitetyu. Seriya: Upravlenie, vychis-litel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer*

Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 163–179.

12. Korenevskij N. A., Rodionova S. N., Krikunova E. V., Safronov R. I., Belozarov V. A. Metody kolichestvennoj ocenki zashchitnyh mekhanizmov organizma na razlichnyh ego urovnyah na osnove gibridnyh nechetkih modelej i ih ispol'zovanie v zadachah prognozirovaniya i medicinskoj diagnostiki [Methods for quantitative assessment of the body's defense mechanisms at its various levels based on hybrid fuzzy models and their use in forecasting and medical diagnostics]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Technique*, 2022, no. 3 (333), pp. 24–27.

13. Korenevskij N. A., Rodionova S. N., Starodubceva L. V., Milostnaya N. A., Korenevskaya E. N. Metod opredeleniya urovnya zashchity organizma po ego oksidantnomu statusu v zadachah ocenki vliyaniya proizvodstvennyh faktorov riska na sostoyanie zdorov'ya [Method for determining the level of protection of the organism by its oxidative status in the tasks of assessing the impact of occupational risk factors on the state of health]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2022, vol. 21, no. 3, pp. 75–89.

14. Al-Kasasbeh R., Korenevskiy N., Aikeyeva A. A., Shaqadan A. A., Maksim I. Developing a biotech scheme using fuzzy logic model to predict occurrence of diseases using person's functional state. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 2020, vol. 62, no. 3, pp. 257–267.

15. Korenevskij N. A., Krupchatnikov R. A., Al'-Kasasbekh R. T. Teoreticheskie osnovy biofiziki akupunktury s prilozheniyami v medicine, psikhologii i ekologii na osnove nechetkih setevykh modelej [Theoretical foundations of the biophysics of acupuncture with applications in medicine, psychology and ecology based on fuzzy network models]. Staryj Oskol, TNT Publ., 2020. 528 p.

16. Al-Kasasbeh R. T., Korenevskiy N., Alshamasin M., Klionskiy D. Bioengineering system for prediction and early prenosological diagnostics of stomach diseases based on energy characteristics of bioactive points with fuzzy logic. *Biosensors and Bioelectronics*, 2015, vol. 6, no. 4, pp. 1–9.

17. Korenevskij N. A., Krupchatnikov R. A. Informacionno-intellektual'nye sistemy dlya vrachej refleksoterapevtov [Information and intellectual systems for reflexologists]. Staryj Oskol, TNT Publ., 2013. 424 p.

18. Al-Kasasbeh R. T., Korenevskiy N., Alshamasin M. S., Klionskiy D., Ionescu F. Numerical software algorithms for monitoring control processes and correcting health by synthesis of hybrid fuzzy rules of decision-making on the basis of changes in energetic characteristics of biologically active points. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 2016, vol. 25, no. 2, pp. 119–137.

19. Al-Kasasbeh R. T., Korenevskiy N. A., Ionescu F., Alshamasin M., Smith A. P., Alwadie A., Aljbours S. Application of fuzzy analysis with the energy condition of bioactive points to the prediction and diagnosis of gastrointestinal tract diseases. *International Journal of Biomedical Engineering and Technology*, 2013, vol. 11, no. 2, pp. 136–154.
20. Al-Kasasbeh R. T., Zaubi M. A. A., Korenevskiy N., Al-Shawawreh F., Alshamasin M. S., Ionescu F. A biotech measurement software system using controlled features for determining the level of psycho-emotional tension on man-machine system operators by bio-active points based on fuzzy logic measures. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 2014, vol. 22, no. 4, pp. 375–395.
21. Al-Kasasbeh R. T., Korenevskiy N., Alshamasin M., Klionskiy D. Bioengineering system for prediction and early prenosological diagnostics of stomach diseases based on energy characteristics of bioactive points with fuzzy logic. *Biosensors and Bioelectronics*, 2015, vol. 6, no. 4, pp. 1–9. <https://doi.org/10.4172/2155-6210.1000182>
22. Safronov R. I., Starodubceva L. V., Krikunova E. V. Perspektivy primeneniya myagkih vychislenij i informacionnyh tekhnologij v profpatologii [Prospects for the use of soft computing and information technology in occupational pathology]. Kursk, Kursk State Agricultural Academy Publ., 2018. 232 p.
23. Shkatova E. S., Magerovskij M. A., Muhatiev Yu. B. [Evaluation of the functional state and functional reserve of the body according to the energy balance of meridian structures]. *Sovremennye tendencii razvitiya tekhniki i tekhnologii. Sbornik nauchnyh trudov po materialam VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Modern trends in the development of technology and technology. A collection of scientific papers based on the materials of the VIII International Scientific and Practical Conference]. Belgorod, IP Tkacheva E. P. Publ., 2015, pp. 132–135. (In Russ.)
24. Korenevskiy N. A., Shulga L. V., Krikunova E. V., Safronov R. I., Siplivy G. V. An Expert System for Predicting and Diagnosing Occupational Diseases of Electric Power Industry Workers. *Biomedical Engineering*, 2022, vol. 55, no. 6, pp. 437–441. <https://doi.org/10.1007/s10527-022-10154-x>
25. Korenevskij N.A., Shutkin A. N., Bojcova E. A., Dmitrieva V. V. Ocenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya na osnove modelej G. Rasha [Assessment and management of health status based on G. Rush models]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Technique*, 2015, no. 6 (294), pp. 37–40.
26. Shutkin A. N. Ocenka urovnya psihoemocional'nogo napryazheniya na osnove kombinirovannyh nechetkih modelej i modeli G. Rasha [Evaluation of the level of psycho-emotional stress based on combined fuzzy models and G. Rush's model]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 593–600.

27. Shutkin A. N., Bojcova E. A., Korenevskaya S. N., Provotorov V. Ya. Ocenka funkcional'nogo sostoyaniya zdorov'ya cheloveka s ispol'zovaniem teorii izmereniya latentnykh peremennykh na osnove modelej G. Rasha [Evaluation of the functional state of human health using the theory of measurement of latent variables based on G. Rasch models]. *Sistemnyy analiz i upravlenie v biomeditsinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2014, vol. 13, no. 4, pp. 927–932.

28. Bojcov A. V. [The use of latent variables to assess human fatigue]. *Mediko-ekologicheskie informacionnye tekhnologii – 2014. Sbornik materialov XVII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Medical and Environmental Information Technologies – 2014. Collection of materials of the XVII International Scientific and Technical Conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2014, pp. 116–122. (In Russ.)

29. Korenevsky N. A., Boytsov A. V., Lukashov M. I., Klyuchikov I. A. [Using the theory of measurements of latent variables with the G. Rasch model for optimizing the schemes of medical and health-improving measures]. *Nauchnyy vzglyad na sovremennyy etap razvitiya obshchestvennykh, tekhnicheskikh, gumanitarnykh i estestvennykh nauk. Aktual'nye problemy. Sbornik nauchnykh statej po itogam vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii* [Scientific view on the modern stage of development of social, technical, humanitarian and natural sciences. Actual problems. Collection of scientific articles on the results of the All-Russian Scientific and Practical conference]. St. Petersburg, 2014, pp. 70–72. (In Russ.)

30. Korenevskij N. A. Ispol'zovanie nechetkoj logiki prinyatiya reshenij dlya medicinskih ekspertnykh sistem [Using fuzzy decision-making logic for medical expert systems]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Technique*, 2015, no. 1 (289), pp. 33–35.

31. Korenevskij N. A., Serebrovskij V. I., Stepashov R. V., Govoruhina T. N. Ispol'zovanie tekhnologii myagkikh vychislenij dlya prognozirovaniya i diagnostiki professional'nykh zabolevanij rabotnikov agropromyshlennogo kompleksa: monografiya [Using Soft Computing Technology to Predict and Diagnose Occupational Diseases of Agro-Industrial Workers]. Kursk, Kursk State Agricultural Academy Publ., 2016. 224 p.

32. Korenevskij N. A. Metod sinteza geterogennykh nechetkikh pravil dlya analiza i upravleniya sostoyaniem biotekhnicheskikh sistem [Method for the synthesis of heterogeneous fuzzy rules for the analysis and control of the state of biotechnical systems.]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universitetyu. Seriya: Upravlenie, vychis-litel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2013, no. 2, pp. 99–103.

33. Serebrovskij V. I., Myasoedova M. A., Serebrovskij V. V., eds. Prognozirovanie i rannaya diagnostika professional'nykh zabolevanij v elektroenergetike na osnove metodologii

sinteza gibridnyh nechetkih reshayushchih pravil [Forecasting and early diagnosis of occupational diseases in the electric power industry based on the methodology for the synthesis of hybrid fuzzy decision rules]. Kursk, Kursk State Agricultural Academy Publ., 2019. 285 p.

34. Korenevskij N. A., Bashir A. S., Gorbatenko S. A. Sintez gibridnyh nechetkih pravil dlya prognozirovaniya, ocenki i upravleniya sostoyaniem zdorov'ya v ekologicheski neblagopriyatnyh regionah [Synthesis of hybrid fuzzy rules for predicting, assessing and managing the state of health in ecologically unfavorable regions]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2013, no. 4, pp. 69–73.

35. Bykov A. V., Korenevskij N. A., Ustinov A. G. Nechetkij algoritm prognoza razvitiya ishemicheskoy bolezni konechnostej dlya razlichnyh etapov vedeniya pacientov [Fuzzy algorithm for predicting the development of ischemic disease of the extremities for various stages of patient management]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2016, no. 2 (19), pp. 142–155.

Информация об авторах / Information about the Authors

Корневский Николай Алексеевич, доктор технических наук, заведующий кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-2048-0956

Nikolai A. Korenevsky, Dr. of Sci. (Engineering), Head of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-2048-0956

Шульга Леонид Васильевич, доктор медицинских наук, профессор, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: asy.gnezdilova@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-6793-7362

Leonid V. Shulga, Dr. of Sci. (Medical), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: asy.gnezdilova@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-6793-7362

Родионова Софья Николавна, кандидат технических наук, доцент кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: knsofia@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4477-3975

Sofia N. Rodionova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: knsofia@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4477-3975

Разумова Ксения Викторовна, кандидат технических наук, преподаватель кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: myelectronworld@mail.ru, ORCID: 0009-0007-7942-8083

Ksenia V. Razumova, Cand. of Sci. (Engineering), Lecturer of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: myelectronworld@mail.ru, ORCID: 0009-0007-7942-8083

Рыбаков Антон Юрьевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: rybakov.ay@novomor.org

Anton Y. Rybakov, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: rybakov.ay@novomor.org

МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-102-121>



УДК 615.47

Синтез моделей прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний на основе гибридной нечеткой технологии

Р. И. Сафронов¹, К. В. Разумова²✉, А. Ю. Рыбаков², А. В. Лях²

¹ Курский государственный аграрный университет имени И. И. Иванова
ул. Карла Маркса, д. 70, г. Курск 305021, Российская Федерация

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

✉ e-mail: myelectronworld@mail.ru

Резюме

Цель исследования – разработка метода синтеза моделей прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний на основе гибридной нечеткой технологии, обеспечивающих повышение качества принятия решений в профпатологии.

Методы. Установлено, что большинство задач, относящихся к исследуемой в работе теме (прогнозирование, ранняя диагностика, оценка степени тяжести и динамики развития профессиональных заболеваний), относятся к классу плохо формализуемых задач с нечеткой и неполной структурой данных, которые рекомендуется решать при использовании методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил, опирающейся на взаимодействие естественного интеллекта врачей и инженера-когнитолога с искусственным гибридным интеллектом. С использованием выбранного математического аппарата предложен метод синтеза нечетких моделей прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний.

Результаты. В качестве конкретного примера решена задача прогнозирования и диагностики ишемической болезни сердца (ИБС) у машинистов электропоездов с выделением таких классов состояний, как: «здоров и появление ИБС не ожидается»; «здоров, но через прогнозируемое время ожидается появление ИБС»; «ранняя стадия ИБС»; «выявлено заболевание ИБС». В результате экспертного оценивания было показано, что уверенность в правильной классификации находится на уровне 0,9. Этот же результат был подтвержден результатами статистических испытаний на репрезентативных контрольных выборках по показателям диагностической чувствительности и специфичности.

© Сафронов Р. И., Разумова К. В., Рыбаков А. Ю., Лях А. В., 2023

Заключение. Предложенный метод синтеза гибридных нечетких моделей позволяет синтезировать гибридные решающие правила, обеспечивающие повышение качества прогнозирования и ранней диагностики исследуемого класса заболеваний как при наличии обучающих выборок, так и при их отсутствии путем компенсации недостатка статистического материала методами формализации клинического мышления. В качестве конкретного примера решена задача прогнозирования и диагностики ишемической болезни сердца у машинистов электропоездов. Показано, что уверенность в правильной классификации находится на уровне 0,9, что позволяет рекомендовать полученные результаты к практическому использованию в профпатологии.

Ключевые слова: профессиональные заболевания; прогнозирование; диагностика; нечеткие решающие правила; ишемическая болезнь сердца; уверенность в принимаемых решениях.

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

Для цитирования: Синтез моделей прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний на основе гибридной нечеткой технологии / Р. И. Сафронов, К. В. Разумова, А. Ю. Рыбаков, А. В. Лях // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 3. С. 102–121. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-102-121>.

Поступила в редакцию 10.07.2023

Подписана в печать 09.08.2023

Опубликована 29.09.2023

Synthesis of Models for Predicting and Diagnosing Occupational Diseases Based on Hybrid Fuzzy Technology

Ruslan I. Safronov¹, Ksenia V. Razumova²✉,
Anton Y. Rybakov², Anton V. Lyakh²

¹ Kursk State Agricultural Academy Named After I. I. Ivanov
70 Karl Marx Str., Kursk 305021, Russian Federation

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

✉ e-mail: myelectronworld@mail.ru

Abstract

The purpose of research is to develop a method for synthesizing models for predicting and diagnosing occupational diseases based on hybrid fuzzy technology, providing an increase in the quality of decision-making in occupational pathology.

Methods. It is established that most of the problems related to the topic under study (forecasting, early diagnosis, assessment of the severity and dynamics of the development of professional diseases) belong to the class of poorly formalized problems with fuzzy and incomplete data structure, which are recommended to be solved using the methodology of synthesis of hybrid fuzzy solving rules based on the interaction of the natural intelligence of doctors and a cognitive engineer with artificial hybrid intelligence. Using the chosen mathematical apparatus, a method for the synthesis of fuzzy models of forecasting and diagnosis of occupational diseases is proposed.

Results. As a concrete example, the problem of predicting and diagnosing ischemic heart disease (CHD) in electric train drivers has been solved with the allocation of such classes of conditions as: "healthy and the appearance of CHD is not expected"; "healthy, but the appearance of CHD is expected after the predicted time"; "early stage of CHD"; "CHD disease has been detected". As a result of expert evaluation, it was shown that the confidence in the correct classification is at the level of 0.9. The same result was confirmed by the results of statistical tests on representative control samples in terms of diagnostic sensitivity and specificity.

Conclusion. The proposed method of synthesis of hybrid fuzzy models makes it possible to synthesize hybrid decision rules that improve the quality of prediction and early diagnosis of the studied class of diseases both in the presence of training samples and in their absence by compensating for the lack of statistical material by methods of formalization of clinical thinking. As a concrete example, the problem of predicting and diagnosing ischemic heart disease in electric train drivers has been solved. It is shown that the confidence in the correct classification is at the level of 0.9, which allows us to recommend the results obtained for practical use in occupational pathology.

Keywords: occupational diseases; prediction; diagnostics; fuzzy decision rules; coronary heart disease; confidence in decisions.

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

For citation: Safronov R. I., Razumova K. V., Rybakov A. Y., Lyakh A. V. Synthesis of Models for Predicting and Diagnosing Occupational Diseases Based on Hybrid Fuzzy Technology. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(3): 102–121. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-102-121>.

Received 10.07.2023

Accepted 09.08.2023

Published 29.09.2023

Введение

Несмотря на успехи современной медицины и достаточно хорошо организованные службы охраны труда, профессиональные болезни относятся к одной из самых многочисленных групп заболеваний. Анализ литературы и собственные исследования показали, что повысить эффективность в борьбе с профессиональными заболеваниями можно, используя современные информационные и интеллектуальные технологии, применяя их для решения задач прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, провоцируемых и развивающихся под воздействием производственных факторов риска. Точные и своевременные прогноз появления и развития профессиональных заболеваний или своевременно определенная ранняя стадия выбранного класса заболеваний позволяют значи-

тельно улучшить качество оказания медицинской помощи исследуемой категории пациентов.

В современной практической профпатологии используют два основных подхода. Первый подход основывается на исследовании взаимосвязи вредных производственных факторов с риском появления и развития профессиональных заболеваний с использованием методов статистического анализа и (или) экспертного оценивания. Второй подход базируется на учении об адаптации, развиваемом в рамках современной адаптологии, с использованием моделей оценки адаптационного потенциала и функционального состояния, по которым судят о его состоянии здоровья. Каждый из этих подходов в отдельности, обладая своими достоинствами и недостатками, не в полной мере обеспечивает современные требования к каче-

ству прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, провоцируемых производственными факторами риска (ПФР), что во многом определяется ограничениями присущими используемому математическому аппарату.

Работами кафедры биомедицинской инженерии (БМИ) ЮЗГУ было установлено, что большинство задач, относящихся к исследуемой в работе теме (прогнозирование, ранняя диагностика, оценка степени тяжести и динамики развития профессиональных заболеваний), относятся к классу плохо формализуемых задач с нечеткой и неполной структурой данных, которые рекомендуется решать при использовании методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), опирающейся на взаимодействие естественного интеллекта врачей и инженера когнитолога с искусственным гибридным интеллектом. Клиническое мышление экспертов восполняет недостаток необходимых статистических данных и позволяет при взаимодействии с инженером когнитологом строить формальные модели для плохо формализуемых задач [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8].

Материалы и методы

Анализ литературы и исследования, проведенные на кафедре БМИ ЮЗГУ, включая исследования авторов, показали, что для синтеза выбранного класса моделей, обладающих достаточной для практической профпатологии точно-

стью принятия решений, кроме основных производственных факторов риска (ПФР) следует учитывать эргономические, экологические и индивидуальные факторы.

При синтезе соответствующих решающих правил (РП) ПФР рекомендуется группировать по блокам факторов, принятых в профессиональной патологии: химические факторы, вызывающие собственно профессиональные заболевания (острые и химические отравления, отдалённые последствия острых отравлений и хронических интоксикаций), и факторы, вызывающие общие заболевания; пылевые факторы (аэрозоли дезинтеграции и конденсации); физические факторы (вибрация, излучение, температурные воздействия, шум, перепады давления); перетруживание отдельных органов и систем; биологические факторы, вызывающие профессиональные инфекции.

Учет эргономических факторов рекомендуется проводить по следующим блокам признаков: антропометрические факторы (соответствие структуры, формы и размеров оборудования структуре, форме, размерам и массе человеческого тела); психологические факторы (соответствие оборудования возможностям и особенностям человеческого восприятия, памяти и мышления); психофизиологические факторы (соответствие оборудования возможностям человека); физиологические факторы (соответствие оборудования физиологическим свойствам человека); гигиенические факторы

(освещенность, температура, газовый состав воздушной среды, давление, влажность, токсичность, запыленность, напряженность электромагнитных полей, шум, радиация, вибрация и т. д.).

По группе экологических показателей рекомендуется учитывать подгруппы экологических показателей, связанных с влиянием используемой техники на окружающую природу, а также показатели, связанные с использованием материальных ресурсов природы.

Основная масса производственных, экологических, эргономических и индивидуальных факторов риска определяется на числовых шкалах, которые в рамках МСГНРП используются как базовые переменные функций принадлежности к исследуемым классам состояний с последующей агрегацией этих функций в искомые решающие правила. При этом следует иметь в виду, что в рамках выбранной методологии ее описание определяет обобщенную концепцию, перечень методов с общими рекомендациями по их отдельному и совместному использованию, не учитывая специфику решаемых в работе задач, что приводит к определенным сложностям в процессе синтеза решающих правил и к потере качества принимаемых решений.

С целью упрощения и упорядочения процедуры синтеза исследуемого класса моделей с учетом особенностей формирования и развития профессиональных заболеваний для различных типов производств разработан метод синтеза гибридных нечетких моделей

прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний, объединяющий парадигмы, принятые в классической профпатологии и гигиене труда и современной адаптологии.

Проведенные исследования показали, что в зависимости от типа решаемых задач и медико-технологических возможностей может быть реализовано три основных варианта синтеза решающих правил прогнозирования и диагностики искомых классов заболеваний.

В первом варианте для всего выбранного набора информативных признаков и комплексных показателей $Y_{\ell j}$ с идентификатором j по классам ω_{ℓ} синтезируются функции принадлежности (ФП) сразу по всем типам решаемых задач $\mu_{\ell}^q(Y_{\ell j})$, где $q = з$ – здоров; $q = п$ – прогноз; $q = р$ – ранняя стадия заболевания; $q = к$ – клинические формы различной степени тяжести.

Полученные ФП группируются по блокам: признаки, характеризующие функциональное состояние (ФС), функциональный резерв (ФР), адаптационный потенциал (АП), объединяемые идентификатором АФ; признаки, описывающие эргономику рабочих мест ЕР; признаки, описывающие экологическую обстановку ЕК; индивидуальные характеристики организма и образа жизни (индивидуальные факторы риска по исследуемым классам заболеваний) ИН; дополнительные информативные признаки, увеличивающие качество принимаемых решений (иммунный статус,

энергетические характеристики биологически активных точек, насыщение крови кислородом, электрофизиологические характеристики сигналов и т. д.) ДР. Для каждого блока (подблока) соответствующие функции принадлежности агрегируются в частные решающие правила расчета уверенности в принимаемых решениях по классам ω_ℓ и задачам q .

По эргономическим факторам риска ФП агрегируются в модели вида

$$UES_\ell = A_{gEeg} [\mu_{es}(t_{ts})], \quad (1)$$

где A_{gEeg} – функция агрегации эргономических составляющих для патологии ω_ℓ ; $\mu_{es}(t_{ts})$ – ФП, определяющая уверенность в появлении и развитии заболеваний (ПРЗ) для патологии ω_ℓ от воздействия на организм человека производственной подсистемы (элемента, системы) s ; t_{ts} – базовая переменная характеризующая s как источник, провоцирующий патологию ω_ℓ . Конкретные нечеткие модели по оценке влияния эргономики на состояние здоровья работающих описаны в работах [4; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15].

Для экологических составляющих ФП агрегируются для расчета частных составляющих уверенности UEK_t , которые далее агрегируются в нечеткие модели типа

$$UV_{\ell q}^{EK} = AG_{\ell q}^{EK}(UEK_t), \quad (2)$$

где $AG_{\ell q}^{EK}$ – агрегатор составляющих уверенностей для показателей, характеризующих уровень экологической

нагрузки по экологическим характеристикам t . Примеры синтеза моделей типа (2) можно найти в работах [2; 4; 5; 8; 9; 10; 16; 17; 18; 19].

Для индивидуальных факторов риска ФП агрегируются в частные модели расчёта уверенности UIN_r с дальнейшим синтезом моделей вида:

$$UV_{\ell q}^{IN} = AG_{\ell q}^{IN}(UIN_r), \quad (3)$$

где $AG_{\ell q}^{IN}$ – агрегатор составляющих уверенностей для индивидуальных факторов риска с идентификатором r . Примеры синтеза моделей типа (3) можно найти в работах [1; 2; 8; 9; 10].

По показателям, характеризующим адаптационный потенциал, функциональное состояние и функциональный резерв, частная уверенность определяется нечеткой моделью вида

$$UV_{\ell q}^{AF} = AG_{\ell q}^{AF}[\mu_\ell^a(AF_p)], \quad (4)$$

где $AG_{\ell q}^{AF}$ – агрегатор составляющих уверенностей для показателей AF . Варианты моделей типа (4) приведены в работах [1; 11; 20; 21; 22; 23].

По дополнительным признакам частная уверенность определяется нечеткой моделью вида

$$UV_{\ell q}^{DP} = AG_{\ell q}^{DP}(VDP_f), \quad (5)$$

где $AG_{\ell q}^{DP}$ – агрегатор составляющих уверенностей для показателей DP с идентификаторами f .

Уверенность в ω_ℓ для задач q по ПФР определяется агрегацией всех составляющих, рассмотренных выше:

$$UFV_{\ell q}^{\text{ПР}} = AGR_{\text{ПР}}(UV_{\ell q}^{\text{EP}}, UV_{\ell q}^{\text{EK}}, UV_{\ell q}^{\text{IN}}, UV_{\ell q}^{\text{AF}}, UV_{\ell q}^{\text{DP}}) \quad (6)$$

где $AGR_{\text{ПР}}$ – агрегатор всех составляющих, характеризующих производственную деятельность.

Уверенность в ω_{ℓ} для задач q по непроизводственным факторам риска определяется агрегацией всех составляющих, характеризующих условия жизни обследуемых вне производства:

$$UFV_q^{\text{нп}} = AGR_{\text{нп}}(UV_{\ell q}^{\text{EP}}, UV_{\ell q}^{\text{EK}}, UV_{\ell q}^{\text{IN}}, UV_{\ell q}^{\text{AF}}, UV_{\ell q}^{\text{ПР}}) \quad (7)$$

где $AGR_{\text{нп}}$ – агрегатор всех составляющих, характеризующих внепроизводственную жизнедеятельность.

Знак $\sim$ над составляющими выражения (7) означает, что они отличаются от составляющих выражения (6).

Уверенность в диагнозах ω_{ℓ} по задачам q по всем факторам риска определяется агрегацией производственных и непроизводственных факторов риска.

Во втором варианте, когда эксперты затрудняются в получении функций принадлежности по всему перечню решаемых задач, им предлагается получить набор более простых для построения ФП к лингвистической переменной «уверенность в появлении и развитии ω_{ℓ} » безотносительно к задачам прогнозирования и диагностики – $\mu_{\ell}^{\text{ПР}}(Y_{\ell j})$, которые агрегируются в нечеткую модель оценки риска ПРЗ – RPR_{ℓ} :

$$RPR_{\ell} = AGP_{\ell}[\mu_{\ell}^{\text{ПР}}(Y_{\ell j})], \quad (8)$$

где AGP_{ℓ} – агрегатор функций принадлежности $\mu_{\ell}^{\text{ПР}}(Y_{\ell j})$.

Нечеткие модели оценки риска ПРЗ могут быть построены для различных составляющих аналогично моделям (1) – (7).

Далее на полученных шкалах RPR_{ℓ} строятся функции принадлежности к выбранным типам лингвистических переменных: «здоров, и появление патологии ω_{ℓ} не ожидается», «здоров, но через прогнозируемое время ожидается появление патологии ω_{ℓ} », «ранняя стадия патологии ω_{ℓ} », «имеется патология ω_{ℓ} ».

Третий вариант является объединением первых двух вариантов для различных блоков информативных признаков.

При выборе типов агрегаторов рекомендуется использовать алгоритмы их выбора, разработанные в рамках МСГНРП и описанные в работах [1; 3; 6].

Значительной проблемой при решении поставленных в работе задач является разделение здоровых людей, не имеющих склонности к профзаболеваниям, от здоровых, имеющих склонности к профзаболеваниям, и болеющих, если не предпринять специальных мер профилактики, а также отделения здоровых от людей, имеющих ранние стадии заболеваний. В классической адаптологии классификация ранних стадий заболеваний осуществляется по показателям уровней адаптации и ФС человека. В рамках выбранной нечеткой

парадигмы, если не срабатывают описанные выше механизмы, эту задачу предлагается решать с использованием нечетких продукционных правил следующего вида:

$$\text{Если } Q_{\ell q}(AF_{\ell pq}), \text{ то } M_{\ell pq}, \quad (9)$$

где $Q_{\ell q}(AF_{\ell pq})$ – нечеткое условие, вычисляемое по показателям адаптационного потенциала, ФС и (или) функционального резерва для задач q , по показателям p , для патологии ω_ℓ (в работах Р. Баевского и его учеников правомерность использования такой логики доказана для $q = p$); $M_{\ell pq}$ – нечеткая модель оценки уверенности по задачам q по показателям p для патологии ω_ℓ .

Результаты и их обсуждение

В качестве примера рассмотрим синтез решающих правил прогнозирования и диагностики ишемической болезни сердца (ИБС) у машинистов электропоездов. Эта болезнь является одной из самых распространенных заболеваний у выбранной категории работников, достаточно часто являющейся причиной потери трудоспособности и даже смерти.

На первом этапе исследований при формировании пространства информативных признаков с использованием метода, описанного в работе [24], было выделено две их группы. В первую группу вошли признаки, связанные с профессиональной деятельностью машинистов электропоездов: уровень эргономичности

кабины электропоезда (YE); уровень хронической психоэмоциональной напряженности (YPH); уровень хронического утомления (YUH); электромагнитное излучение в кабине машиниста (UEI).

По этой группе признаков получена модель оценки риска возникновения и развития ИБС (класс ω_u) вида

$$URI_1(q+1) = URI_1(q) + \mu_u(z_{i+1})[1 - URI_1(q)], \quad (10)$$

где URI_1 – уверенность в ω_u по профессиональной группе признаков:

$$\begin{aligned} \mu_u(z_1) &= URI_1(1) = \mu_u(YE); \\ \mu_u(z_2) &= \mu_u(YPH); \mu_u(z_3) = \mu_u(YUH); \\ \mu_u(z_4) &= \mu_u(UEI). \end{aligned}$$

Во вторую группу факторов риска заболевания и развития ИБС эксперты руководствовались рекомендациями работ [25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 33; 34], в которые вошли признаки, характеризующие антиоксидантный статус организма и энергетический разбаланс биологически активных точек (БАТ), связанных с заболеванием сердца. Антиоксидантный статус организма определяется по показателям перекисного окисления липидов (ПОЛ) и антиокислительной активности (АОА). С учетом рекомендаций [25; 26] для этих показателей в качестве базовых переменных для соответствующих функций принадлежности $\mu_u(\delta x_{\Pi})$ и $\mu_u(\delta x_A)$ выбраны величины отклонения ПОЛ и АОА от их номинальных значений:

$$\delta x_{\Pi} = \frac{x_{\Pi}^N - x_{\Pi}^T}{x_{\Pi}^N} \cdot 100\%,$$

$$\delta x_{\Pi} = \frac{x_A^N - x_A^T}{x_A^N} \cdot 100\%,$$

где x_{Π}^N и x_A^N – ПОЛ и АОА, измеренные на репрезентативной группе здоровых людей; x_{Π}^T и x_A^T – ПОЛ и АОА у обследуемого пациента.

Соответствующие функции принадлежности имеют вид

$$\mu_u(\delta x_{\Pi}) = \begin{cases} 0, & \text{если } \delta x_{\Pi} < 10, \\ 0,005\delta x_{\Pi} - 0,005, & \text{если } 10 \leq \delta x_{\Pi} < 50, \\ 0,2, & \text{если } \delta x_{\Pi} \geq 50, \end{cases}$$

$$\mu_u(\delta x_A) = \begin{cases} 0, & \text{если } \delta x_A < 10, \\ 0,003\delta x_A - 0,003, & \text{если } 10 \leq \delta x_A < 60, \\ 0,15, & \text{если } \delta x_A \geq 60. \end{cases}$$

С учетом рекомендаций [27; 28; 29; 30; 31; 32; 33; 34] в качестве информативных точек для класса ω_u были выбраны точки C4, C5, C7, C8, C9 с парой диагностически значимых точек (ДЗТ) C7, C9.

Энергетический разбаланс БАТ, «связанных» с сердечно-сосудистой системой, определяет выражение

$$\begin{aligned} &\text{Если } [(\delta R_{C7u} \delta R_{C9}) \geq 15\%], \\ &\text{то } \left[SRB = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 f_R(\delta R_j) \right] \\ &\text{иначе } (SRB = 0), \end{aligned}$$

где $f_R(\delta R_j)$ – нормирующая функция энергетического разбаланса для точки j с областью определения $[0, \dots, 1]$;

$$\delta R_1 = \delta R_{C4}; \quad \delta R_2 = \delta R_{C5}; \quad \delta R_3 = \delta R_{C7};$$

$$\delta R_4 = \delta R_{C8}; \quad \delta R_5 = \delta R_{C9}.$$

График ФП описывается выражением

$$\begin{aligned} \mu_n(SRB) = & \begin{cases} 0, & \text{если } SRB < 0,3, \\ 0,75SRB - 0,225, & \text{если } 0,3 \leq SRB < 0,7, \\ 0,3, & \text{если } SRB \geq 0,7. \end{cases} \end{aligned}$$

Аналогично (10), уверенность в ω_u по этой группе признаков определяется выражением

$$URI_2(p+1) = URI_2(p) + \mu_u(S_{i+1})[1 - URI_2(p)], \quad (11)$$

где $URI_2(1) = \mu_u(S_1) = \mu_u(\delta x_{\Pi})$; $\mu_u(S_2) = \mu_u(\delta x_A)$; $\mu_u(S_3) = \mu_u(SRB)$.

Для полученных составляющих модель для оценки уверенности в появлении и развитии ИБС имеет вид

$$URI = URI_1 + URI_2 - URI_1 \cdot URI_2. \quad (12)$$

На шкале URI получены ФП μ_o , μ_n , μ_p , μ_6 к классам «здоров и появление ИБС не ожидается», «здоров, но через прогнозируемое время ожидается появление ИБС», «ранняя стадия ИБС», «выявлено заболевание ИБС». Рассмотрим графики этих функций принадлежности (рис. 1).

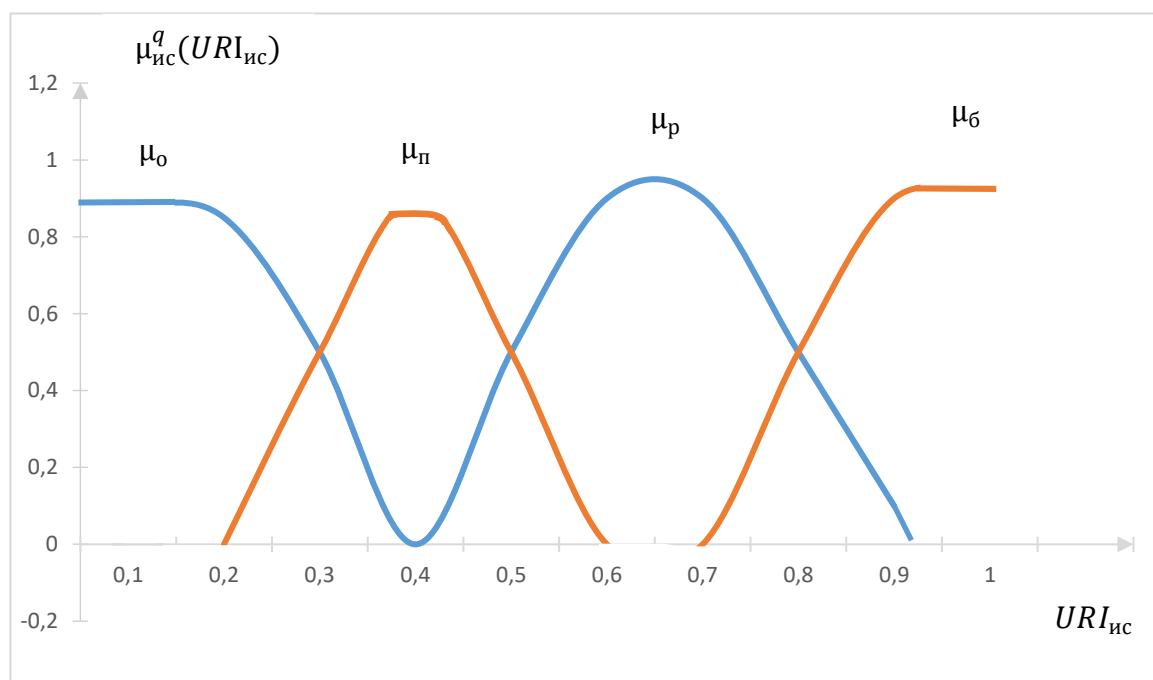


Рис. 1. Прогностические и диагностические функции принадлежности относительно ишемической болезни сердца (ИБС)

Fig. 1. Prognostic and diagnostic functions of belonging in relation to coronary heart disease (CHD)

Из рисунка 1 видно, что эксперты определили уверенность в правильной классификации на уровне 0,9. Этот же результат был подтвержден результатами статистических испытаний на репрезентативных контрольных выборках по показателям диагностической чувствительности и специфичности.

Выводы

Предложенный метод синтеза гибридных нечетких моделей позволяет синтезировать гибридные решающие правила, обеспечивающие повышение качества прогнозирования и ранней диагностики исследуемого класса заболева-

ний как при наличии обучающих выборок, так и при их отсутствии путем компенсации недостатка статистического материала методами формализации клинического мышления. В качестве конкретного примера решена задача прогнозирования и диагностики ишемической болезни сердца у машинистов электропоездов. В результате экспертного оценивания и статистических испытаний на репрезентативных контрольных выборках было показано, что уверенность в правильной классификации находится на уровне 0,9, что позволяет рекомендовать полученные результаты к практическому использованию в профпатологии.

Список литературы

1. Оценка и управление состояния здоровья обучающихся на основе гибридных интеллектуальных технологий: монография / Н. А. Корневский, А. Н. Шуткин, С. А. Горбатенко, В. И. Серебровский. Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2016. 72 с.
2. 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: Издательство Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2016. 224 с.
3. 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.
4. Прогнозирование и ранняя диагностика профессиональных заболеваний в электроэнергетике на основе методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил: монография / В. И. Серебровский, М. А. Мясодедова, В. В. Серебровский [и др.]. Курск: Издательство Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2019. 285 с.
5. 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.
6. Корневский Н. А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.
7. Корневский Н. А., Разумова К. В. Синтез коллективов гибридных нечетких моделей оценки состояния сложных систем // Наукоемкие технологии. 2014. Т. 15, № 12. С. 31–40.
8. Сафронов Р. И., Стародубцева Л. В., Крикунова Е. В. Перспективы применения мягких вычислений и информационных технологий в профпатологии: монография. Курск: Издательство Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2018. 232 с.
9. Экспертная система контроля состояния пациентов, контактирующих с промышленными ядохимикатами / С. А. Филист, Р. И. Сафронов, Л. В. Шульга, Г. В. Сипливый, Е. В. Крикунова, Н. А. Милостная // Медицинская техника. 2021. № 4. С. 30–32.

10. Экспертная система прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний работников электроэнергетики / Н. А. Корневский, Р. И. Сафронов, Л. В. Шульга, Г. В. Сипливый, Е. В. Крикунова // Медицинская техника. 2021. № 6. С. 48–51.

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

12. Assessment of Ergonomics of Biotechnical Systems Using Shortliffe Fuzzy Models / N. A. Korenevsky, V. N. Gadalov, E. N. Korovin, V. I. Serebrovskiy // Biomedical Engineering November. 2013. Vol. 47, is. 4. P. 173–176.

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

14. Fuzzy model evaluation of vehicles ergonomics and its influence on occupational diseases / R. T. Al-Kasasbeh, M. S. Alshamasin, N. Korenevskiy, S. Korenevskya, E. T. Al-Kasasbeh, I. Maksim // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. N 792. P. 143–154.

15. Контроль динамики развития ишемических процессов в сердце по энергетическому разбалансу меридианных структур организма / Н. А. Корневский, И. Ю. Григоров, К. В. Разумова, В. А. Горбунов, В. В. Дмитриева, С. В. Дегтярев // Медицинская техника. 2020. № 1 (319). С. 47–49.

16. Синтез коллективов нечетких решающих правил для медицинских экспертных систем / Н. А. Корневский, И. И. Хрипина, А. Н. Шуткин, К. В. Разумова // Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2015: тезисы доклада. М.: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2015. С. 64.

17. Метод синтеза математических моделей прогнозирования и ранней диагностики нарушений когнитивных функций / Н. А. Корневский, С. Н. Родионова, А. В. Поляков, Т. Н. Говорухина // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 4. С. 85–92.

18. Метод синтеза математических моделей прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний работников предприятий электроэнергетики / Н. А. Корневский, М. А. Мясоедова, К. В. Разумова, А. В. Серебровский // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 2 (31). С. 127–143.

19. Использование методологии синтеза коллективов гибридных нечетких моделей для решения задач оценки состояния и управления сложными биотехническими системами / Н. А. Корневский, Р. В. Степашов, А. Н. Шуткин, Е. В. Цимбыл, С. Н. Родионова,

Д. С. Родионов // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2018. Т. 14, № 3. С. 593.

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

21. Оценка функционального состояния здоровья человека с использованием теории измерения латентных переменных на основе моделей Г. Раша / А. Н. Шуткин, Е. А. Бойцова, С. Н. Корневская, В. Я. Провоторов // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2014. Т. 13, № 4. С. 927–932.

22. Сафронов Р. И. Роль адаптационных механизмов в защите организма от производственных факторов риска // Биотехнология и биомедицинская инженерия: сборник научных трудов по материалам XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 87-летию Курского государственного медицинского университета (27 октября 2022 г.). Курск: Издательство Курского государственного медицинского университета Минздрава России, 2022. С. 183–186.

23. Сафронов Р. И., Крикунова Е. В. Оценка влияния условий труда на состояние здоровья человека по его адаптационным резервам и функциональному состоянию // Биотехнология и биомедицинская инженерия: сборник научных трудов по материалам XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 87-летию Курского государственного медицинского университета (27 октября 2022 г.). Курск: Издательство Курского государственного медицинского университета Минздрава России, 2022. С. 123–126.

24. Метод комплексной оценки уровня информативности классификационных признаков в условиях нечеткой структуры данных / Н. А. Корневский, В. В. Аксенов, С. Н. Родионова, С. Н. Гонтарев, Л. П. Лазурина, Р. И. Сафронов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. № 3. С. 80–96.

25. Количественная оценка защитных механизмов организма по его оксидантному статусу / Н. А. Корневский, С. Н. Родионова, Е. В. Крикунова, Л. В. Стародубцева, М. В. Скиданчук // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 4. С. 146–162.

26. Метод определения уровня защиты организма по его оксидантному статусу в задачах оценки влияния производственных факторов риска на состояние здоровья / Н. А. Корневский, С. Н. Родионова, Л. В. Стародубцева, Н. А. Милостная, Е. Н. Корневская // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2022. Т. 21, № 3. С. 75–89.

27. Корневский Н. А., Крупчатников Р. А. Информационно-интеллектуальные системы для врачей рефлексотерапевтов: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 424 с.

28. Методы количественной оценки защитных механизмов организма на различных его уровнях на основе гибридных нечетких моделей и их использование в задачах прогнозирования и медицинской диагностики / Н. А. Корневский, С. Н. Родионова, Е. В. Крикунова, Р. И. Сафронов, В. А. Белозеров // Медицинская техника. 2022. № 3 (333). С. 24–27.

29. Корневский Н. А., Крупчатников Р. А., Аль-Касасбех Р. Т. Теоретические основы биофизики акупунктуры с приложениями в медицине, психологии и экологии на основе нечетких сетевых моделей: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2020. 528 с.

30. Bioengineering system for prediction and early prenosological diagnostics of stomach diseases based on energy characteristics of bioactive points with fuzzy logic / R. T. Al-Kasasbeh, N. Korenevskiy, M. Alshamasin, D. Klionskiy // Biosensors and Bioelectronics. 2015. Vol. 6, N 4. P. 1–9.

31. Numerical software algorithms for monitoring control processes and correcting health by synthesis of hybrid fuzzy rules of decision-making on the basis of changes in energetic characteristics of biologically active points / R. T. Al-Kasasbeh, N. Korenevskiy, M. S. Alshamasin, D. Klionskiy, F. Ionescu // International Journal of Modelling, Identification and Control. 2016. Vol. 25, N 2. P. 119–137.

32. Application of fuzzy analysis with the energy condition of bioactive points to the prediction and diagnosis of gastrointestinal tract diseases / R. T. Al-Kasasbeh, N. A. Korenevskiy, F. Ionescu, M. Alshamasin, A. P. Smith, A. Alwadie, S. Aljbour // International Journal of Biomedical Engineering and Technology. 2013. Vol. 11, N 2. P. 136–154.

33. A biotech measurement software system using controlled features for determining the level of psycho-emotional tension on man-machine system operators by bio-active points based on fuzzy logic measures / R. T. Al-Kasasbeh, M. A. A. Zaubi, N. Korenevskiy, F. Al-Shawawreh, M. S. Alshamasin, F. Ionescu // International Journal of Modelling, Identification and Control. 2014. Vol. 22, N 4. P. 375–395.

34. Bioengineering system for prediction and early prenosological diagnostics of stomach diseases based on energy characteristics of bioactive points with fuzzy logic / R. T. Al-Kasasbeh, N. Korenevskiy, M. Alshamasin, D. Klionskiy // Biosensors and Bioelectronics. 2015. Vol. 6, N 4. P. 1–9. <https://doi.org/10.4172/2155-6210.1000182>.

35. Метод синтеза нечетких моделей и ранней диагностики профессиональных заболеваний работников гальванических производств / Н. А. Корневский, И. Ю. Григоров, Т. Н. Говорухина, Р. А. Крупчатников // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 3. С. 163–169.

References

1. Korenevskij N. A., Shutkin A. N., Gorbatenko S. A., Serebrovskij V. I. Ocenka i upravlenie sostoyaniya zdorov'ya obuchayushchihsya na osnove gibridnyh intellektual'nyh tekhnologij [Assessment and management of the health status of students based on hybrid intellectual technologies]. Staryj Oskol, Tonkie naukoemkie tekhnologii Publ., 2016. 472 p.
2. Korenevskij N. A., Serebrovskij V. I., Stepashov R. V., Govoruxina T. N. Ispol'zovanie tekhnologii myagkih vychislenij dlya prognozirovaniya i diagnostiki professional'nyh zabolevanij rabotnikov agropromyshlennogo kompleksa [Using Soft Computing Technology to Predict and Diagnose Occupational Diseases of Agro-Industrial Workers]. Kursk, Kursk State Agricultural Academy Publ., 2016. 224 p.
3. Korenevskij N. A. Metod sinteza geterogennyh nechetkih pravil dlya analiza i upravleniya sostoyaniem biotekhnicheskikh sistem [Method for the synthesis of heterogeneous fuzzy rules for the analysis and control of the state of biotechnical systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universitetyu. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2013, no. 2, pp. 99–103.
4. Serebrovskij V. I., Myasoedova M. A., Serebrovskij V. V., eds. Prognozirovanie i rannaya diagnostika professional'nyh zabolevanij v elektroenergetike na osnove metodologii sinteza gibridnyh nechetkih reshayushchih pravil [Forecasting and early diagnosis of occupational diseases in the electric power industry based on the methodology for the synthesis of hybrid fuzzy decision rules]. Kursk, Kursk State Agricultural Academy Publ., 2019. 285 p.
5. Korenevskij N. A., Bashir A. S., Gorbatenko S. A. Sintez gibridnyh nechetkih pravil dlya prognozirovaniya, ocenki i upravleniya sostoyaniem zdorov'ya v ekologicheskimi neblagopriyatnyh regionah [Synthesis of hybrid fuzzy rules for forecasting, assessment and management of health in ecologically unfavorable regions]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universitetyu. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2013, no. 4, pp. 69–73.
6. Korenevskij N. A., Rodionova S. N., Xripina I. I. Metodologiya sinteza gibridnyh nechetkih reshayushchih pravil dlya medicinskih intellektual'nyh sistem podderzhki prinyatiya reshenij [Methodology for the synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems]. Staryj Oskol, TNT Publ., 2019. 472 p.
7. Korenevskij N. A., Razumova K. V. Sintez kolektivov gibridnyh nechetkih modelej ocenki sostoyaniya slozhnyh sistem [Synthesis of collectives of hybrid fuzzy models for assessing the state of complex systems]. *Naukoemkie tekhnologii = High-Tech Technologies*, 2014, vol. 15, no. 12, pp. 31–40.

8. Safronov R. I., Starodubceva L. V., Krikunova E. V. Perspektivy primeneniya myagkih vychislenij i informacionnyh tekhnologij v profpatologii [Prospects for the use of soft computing and information technologies in occupational pathology]. Kursk, Kursk State Agricultural Academy Publ., 2018. 232 p.

9. Filist S. A., Safronov R. I., Shul'ga L. V., Siplivij G. V., Krikunova E. V., Milostnaya N. A. Ekspertnaya sistema kontrolya sostoyaniya pacientov, kontaktiruyushchih s pro-myshlennymi yadokhimikatami [Expert system for monitoring the condition of patients in contact with industrial pesticides]. *Medicinskaya texnika = Medical Equipment*, 2021, no. 4, pp. 30–32.

10. Korenevskij N. A., Safronov R. I., Shul'ga L. V., Siplivij G. V., Krikunova E. V. Ekspertnaya sistema prognozirovaniya i diagnostiki professional'nyh zabolevanij rabotnikov elektroenergetiki [Expert system for predicting and diagnosing occupational diseases of electric power workers]. *Medicinskaya texnika = Medical Equipment*, 2021, no. 6, pp. 48–51.

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

12. Korenevsky N. A., Gadlov V. N., Korovin E. N., Serebrovskiy V. I. Assessment of Ergonomics of Biotechnical Systems Using Shortliffe Fuzzy Models. *Biomedical Engineering*, 2013, vol. 47, is. 4, pp. 173–176.

13. Al-Kasasbeh R. T., Alshamasin M. S., Korenevskiy N., Maksim I. Method of ergonomics assessment of technical systems and its influence on operators health on basis of hybrid fuzzy models. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, no. 590, pp. 581–592.

14. Al-Kasasbeh R. T., Alshamasin M. S., Korenevskiy N., Korenevskya S., Al-Kasasbeh E. T., Maksim I. Fuzzy model evaluation of vehicles ergonomics and its influence on occupational diseases. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019, no. 792, pp. 143–154.

15. Korenevskij N. A., Grigorov I. Yu., Razumova K. V., Gorbunov V. A., Dmitrieva V. V., Degtyarev S. V. Kontrol' dinamiki razvitiya ishemicheskikh processov v serdce po energeticheskomu razbalansu meridiannyh struktur organizma [Control of the dynamics of development of ischemic processes in the heart according to the energy imbalance of the meridian structures of the body]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Technique*, 2020, no. 1 (319), pp. 47–49.

16. Korenevskij N. A., Hripina I. I., Shutkin A. N., Razumova K. V. [Synthesis of collectives of fuzzy decision rules for medical expert systems]. *Nauchnaya sessiya NIYAU MIFI –*

2015. *Tezisy doklada* [Scientific session of NRU MEPhI – 2015. Abstracts of the report]. Moscow, National Research Nuclear University "MEPhI", 2015, p. 64. (In Russ.)

17. Korenevskij N. A., Rodionova S. N., Polyakov A. V., Govoruhina T. N. Metod sinteza matematicheskikh modelej prognozirovaniya i rannej diagnostiki narushenij kognitivnykh funkciy [Method for synthesizing mathematical models of forecasting and early diagnosis of cognitive impairment]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2019, vol. 18, no. 4, pp. 85–92.

18. Korenevskij N. A., Myasoedova M. A., Razumova K. V., Serebrovskij A. V. Metod sinteza matematicheskikh modelej prognozirovaniya i diagnostiki professional'nykh zabolevanij rabotnikov predpriyatij elektroenergetiki [Method for synthesizing mathematical models for predicting and diagnosing occupational diseases of employees of electric power enterprises]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universitetyu. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, vol. 9, no. 2 (31), pp. 127–143.

19. Korenevskij N. A., Stepashov R. V., Shutkin A. N., Cimbyl E. V., Rodionova S. N., Rodionov D. S. Ispol'zovanie metodologii sinteza kolektivov gibridnykh nechetkiy modelej dlya resheniya zadach ocenki sostoyaniya i upravleniya slozhnyimi biotekhnicheskimi sistemami [Using the methodology of synthesis of collectives of hybrid fuzzy models for solving problems of assessing the state and control of complex biotechnical systems]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2018, vol. 14, no. 3, pp. 593.

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

21. Shutkin A. N., Bojcova E. A., Korenevskaya S. N., Provotorov V. YA. Ocenka funkcional'nogo sostoyaniya zdorov'ya cheloveka s ispol'zovaniem teorii izmereniya latentnykh peremennykh na osnove modelej G. Rasha [Evaluation of the functional state of human health using the theory of measurement of latent variables based on G. Rasch models]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2014, vol. 13, no. 4, pp. 927–932.

22. Safronov R. I. [The role of adaptive mechanisms in protecting the body from industrial risk factors]. *Biotehnologiya i biomedicinskaya inzheneriya. Sbornik nauchnykh trudov po materialam XII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*,

posvyashchennoj 87-letiyu Kurskogo gosudarstvennogo medicinskogo universiteta (27 oktyabrya 2022 g.) [Biotechnology and biomedical engineering. A collection of scientific papers based on the materials of the XII All-Russian scientific and practical conference with international participation dedicated to the 87th anniversary of Kursk State Medical University (October 27, 2022)]. Kursk, Kursk State Medical University of the Ministry of Health of Russia Publ., 2022, pp. 183–186. (In Russ.)

23. Safronov R. I., Krikunova E. V. [Assessment of the impact of working conditions on the state of human health in terms of its adaptive reserves and functional state]. *Biotekhnologiya i biomedicinskaya inzheneriya. Sbornik nauchnyh trudov po materialam XII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoj 87-letiyu Kurskogo gosudarstvennogo medicinskogo universiteta (27 oktyabrya 2022 g.)* [Biotechnology and biomedical engineering. A collection of scientific papers based on the materials of the XII All-Russian scientific and practical conference with international participation dedicated to the 87th anniversary of Kursk State Medical University (October 27, 2022)]. Kursk, Kursk State Medical University of the Ministry of Health of Russia Publ., 2022, pp. 123–126. (In Russ.)

24. Korenevskij N. A., Aksenov V. V., Rodionova S. N., Gontarev S. N., Lazurina L. P., Safronov R. I. Metod kompleksnoj ocenki urovnya informativnosti klassifikacionnyh priznakov v usloviyah nechetkoj struktury dannyh [A method for a comprehensive assessment of the level of information content of classification features in conditions of a fuzzy data structure]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universitetyu. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2022, no. 3, pp. 80–96.

25. Korenevskij N. A., Rodionova S. N., Krikunova E. V., Starodubceva L. V., Skidanchuk M. V. Kolichestvennaya ocenka zashchitnyh mekhanizmov organizma po ego oksidant-nomu statusu [Quantitative assessment of the body's defense mechanisms according to its oxidative status]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universitetyu. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 146–162.

26. Korenevskij N. A., Rodionova S. N., Starodubceva L. V., Milostnaya N. A., Korenevskaya E. N. Metod opredeleniya urovnya zashchity organizma po ego oksidantnomu statusu v zadachah ocenki vliyaniya proizvodstvennyh faktorov riska na sostoyanie zdorov'ya [Method for determining the level of protection of the organism by its oxidative status in the tasks of assessing the impact of occupational risk factors on the state of health]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2022, vol. 21, no. 3, pp. 75–89.

27. Korenevskij N. A., Krupchatnikov R. A. Informacionno-intellektual'nye sistemy dlya vrachej refleksoterapevtov [Information and intellectual systems for reflexologists]. Staryj Oskol, TNT Publ., 2013. 424 p.

28. Korenevskij N. A., Rodionova S. N., Krikunova E. V., Safronov R. I., Belozarov V. A. Metody kolichestvennoj ocenki zashchitnyh mekhanizmov organizma na razlichnyh ego urovnjah na osnove gibridnyh nechetkih modelej i ih ispol'zovanie v zadachah prognozirovaniya i medicinskoj diagnostiki [Methods for quantitative assessment of the body's defense mechanisms at its various levels based on hybrid fuzzy models and their use in forecasting and medical diagnostics]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Technique*, 2022, no. 3 (333), pp. 24–27.

29. Korenevskij N. A., Krupchatnikov R. A., Al-Kasasbekh R. T. Teoreticheskie osnovy biofiziki akupunktury s prilozheniyami v medicine, psihologii i ekologii na osnove nechetkih setevykh modelej [Theoretical foundations of the biophysics of acupuncture with applications in medicine, psychology and ecology based on fuzzy network models]. Staryj Oskol, TNT Publ., 2020. 528 p.

30. Al-Kasasbeh R.T., Korenevskiy N., Alshamasin M., Klionskiy D. Bioengineering system for prediction and early prenosological diagnostics of stomach diseases based on energy characteristics of bioactive points with fuzzy logic. *Biosensors and Bioelectronics*, 2015, vol. 6, no. 4, pp. 1–9.

31. Al-Kasasbeh R.T., Korenevskiy N., Alshamasin M. S., Klionskiy D., Ionescu F. Numerical software algorithms for monitoring control processes and correcting health by synthesis of hybrid fuzzy rules of decision-making on the basis of changes in energetic characteristics of biologically active points. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 2016, vol. 25, no. 2, pp. 119–137.

32. Al-Kasasbeh R. T., Korenevskiy N. A., Ionescu F., Alshamasin M., Smith A. P., Alwadie A., Aljbour S. Application of fuzzy analysis with the energy condition of bioactive points to the prediction and diagnosis of gastrointestinal tract diseases. *International Journal of Biomedical Engineering and Technology*, 2013, vol. 11, no. 2, pp. 136–154.

33. Al-Kasasbeh R. T., Zaubi M. A. A., Korenevskiy N., Al-Shawawreh F., Alshamasin M. S., Ionescu F. A biotech measurement software system using controlled features for determining the level of psycho-emotional tension on man-machine system operators by bio-active points based on fuzzy logic measures. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 2014, vol. 22, no. 4, pp. 375–395.

34. Al-Kasasbeh R. T., Korenevskiy N., Alshamasin M., Klionskiy D. Bioengineering system for prediction and early prenosological diagnostics of stomach diseases based on energy characteristics of bioactive points with fuzzy logic. *Biosensors and Bioelectronics*, 2015, vol. 6, no. 4, pp. 1–9. <https://doi.org/10.4172/2155-6210.1000182>

35. Korenevskij N. A., Grigorov I. Yu., Govoruhina T. N., Krupchatnikov R. A. Metod sinteza nechetkih modelej i rannej diagnostiki professional'nyh zabolevanij rabotnikov

Информация об авторах / Information about the Authors

Сафронов Руслан Игоревич, кандидат
технических наук, доцент кафедры
электротехники и электроэнергетики,
Курский государственный аграрный
университет имени И. И. Иванова,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: russafronov@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-0966-6514

Ruslan I. Safronov, Cand. of Sci. (Engineering),
Associate Professor of the Department
of Electrical Engineering and Power Engineering,
Kursk State Agrarian University named
after I. I. Ivanova, Kursk, Russian Federation,
e-mail: russafronov@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-0966-6514

Разумова Ксения Викторовна, кандидат
технических наук, преподаватель кафедры
биомедицинской инженерии, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: myelectronworld@mail.ru,
ORCID: 0009-0007-7942-8083

Ksenia V. Razumova, Cand. of Sci.
(Engineering), Lecturer of the Department
of Biomedical Engineering, Southwest State
University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: myelectronworld@mail.ru,
ORCID: 0009-0007-7942-8083

Рыбаков Антон Юрьевич, аспирант кафедры
биомедицинской инженерии, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: rybakov.ay@novomor.org,
ORCID: 0000-0001-5821-611X

Anton Y. Rybakov, Post-Graduate Student
of the Department of Biomedical Engineering,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: rybakov.ay@novomor.org,
ORCID: 0000-0001-5821-611X

Лях Антон Викторович, аспирант кафедры
биомедицинской инженерии, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru,
ORCID: 0000-0001-8388-9586

Anton V. Lyakh, Post-Graduate Student
of the Department of Biomedical Engineering,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru,
ORCID 0000-0001-8388-9586

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-122-134>

УДК 004.052

Модель формирования динамической структуры для установления источника сообщений в памяти приемника

А. А. Чеснокова¹ ✉

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

✉ e-mail: chesnokova.50@yandex.ru

Резюме

Цель исследования – повышение скорости процедур определения источника данных в режиме сцепления блоков за счет анализа динамической списочной структуры сообщений, формируемой в памяти приемника в результате промежуточных вычислений.

Методы. Модель формирования динамической списочной структуры строится на основе аппаратной реализации метода ограничения множества обрабатываемых приемником блоков данных. В состав сообщения входит специальное служебное слово, содержимое которого проверяется на предмет попадания в диапазон значений, формируемый приемником при поступлении каждого блока данных. Описанное ограничение позволяет снизить количество типовых операций сравнения служебных слов, выполняемых при определении источника сообщений, а также снижает вероятность возникновения ошибок определения источника данных.

Результаты. На основе модели формирования динамической древовидной списочной структуры получены распределения априорных вероятностей числа узлов определённого уровня в случае возникновения ошибок определения источника данных и без таковых. Это позволяет получить значащие апостериорные вероятности ошибки в зависимости от наблюдаемого числа узлов определённого уровня. Сформулированы критерии принятия решения об ошибке определения источника на основании подсчёта числа узлов до полного завершения формирования древовидной структуры и до этапа её анализа. Это позволяет уменьшить вычислительную сложность процедуры определения источника данных в режиме сцепления блоков и снизить затраты памяти на хранение промежуточных результатов.

Заключение. В ходе проведенного исследования было выявлено, что для последовательностей сообщений длиной более 20 обнаружение более чем 8 посторонних ветвей формируемой динамической списочной структуры позволяет с 90%-ной вероятностью утверждать, что процедура определения источника завершилась ошибкой. Отказ от передачи последующих сообщений последовательности и от выполнения операций обработки древовидной структуры позволяет повысить скорость проведения процедуры определения источника сообщений и снизить его вычислительную сложность.

Ключевые слова: источник сообщений; информационный поток; древовидная структура; модель; ошибка; априорные вероятности; апостериорная вероятность ошибки.

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

Для цитирования: Чеснокова А. А. Модель формирования динамической структуры для установления источника сообщений в памяти приемника // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 3. С. 122–134. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-122-134>.

Поступила в редакцию 11.07.2023

Подписана в печать 09.08.2023

Опубликована 29.09.2023

A Model of Forming a Dynamic Structure for Establishing the Source of Messages in the Receiver's Memory

A. A. Chesnokova¹ ✉

¹ Southwest State University

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

✉ e-mail: chesnokova.50@yandex.ru

Abstract

The purpose of research is increasing the speed of procedures for determining the data source in the block coupling mode, due to the analysis of the dynamic list structure of messages formed in the receiver's memory as a result of intermediate calculations.

Methods. The model of forming a dynamic list structure is based on the hardware implementation of the method of limiting the set of data blocks processed by the receiver. The data package includes a special service word, the contents of which are checked for falling into the range of values formed by the receiver when each data block is received. The described restriction reduces the number of typical comparison operations of service words performed when determining the source of messages, and also reduces the likelihood of errors in determining the data source.

Results. Based on the model of the formation of a dynamic tree-like list structure, distributions of a priori probabilities of the number of nodes of a certain level are obtained in case of errors in determining the data source and without them. This allows us to obtain significant a posteriori error probabilities depending on the observed number of nodes of a certain level. The criteria for making a decision on the error of determining the source based on the calculation of the number of nodes before the complete completion of the formation of the tree structure and before the stage of its analysis are formulated. This reduces the computational complexity of the procedure for determining the data source in the block coupling mode and reduces the memory costs for storing intermediate results.

Conclusion. In the course of the study, it was revealed that for sequences of messages with a length of more than 20, the detection of more than 8 extraneous branches of the dynamic list structure being formed allows us to state with a 90% probability that the procedure for determining the source ended in an error. The refusal to transmit subsequent sequence messages and to perform processing operations of the tree structure allows to increase the speed of the procedure for determining the source of messages and reduce its computational complexity.

Keywords: message source; information flow; tree structure; model; error; a priori probabilities; a posteriori error probability.

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

For citation: Chesnokova A. A. A Model of Forming a Dynamic Structure for Establishing the Source of Messages in the Receiver's Memory. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(3): 122–134. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-122-134>.

Received 11.07.2023

Accepted 09.08.2023

Published 29.09.2023

Введение

Актуальным направлением развития распределенных информационных систем является создание специализированных устройств мониторинга, управления, оценки и анализа состояний технических систем. Работоспособность таких систем зависит от корректности информационного обмена между устройствами. Аутентификация источников является основополагающим элементом обеспечения корректности такого информационного обмена. Идентификация, выявление ошибок определения источника сообщений – одни из основных задач, решаемых устройствами, находящимися в составе таких систем. Корректная обработка поступающих данных повышает достоверность определения источника сообщений.

В случае, если для идентификации используются не методы обработки единичных блоков [1; 2; 3; 4; 5], а методы группового кодирования или кодирования в режиме сцепления блоков [6; 7; 8; 9], выполнение различных преобразований над поступающими данными требует хранения промежуточных результатов. В работе [10] используется матричная структура хранения. В результате обработки проверочной матрицы и значений, формирующихся блоков образуется третья матрица, на основе которой делается вывод о корректности идентификации источника. Для определения источника сообщений применим схожий метод, основанный на формировании квадратичной матрицы данных из

отдельных блоков [11]. В работе [12] авторами предложена схема временного хранения данных: часть данных последовательно извлекается из памяти на основе анализа предыдущих данных.

При использовании кодирования в режиме сцепления блоков предпочтительным является использование древовидных структур хранения промежуточных результатов обработки [13].

Любое хранение подобной совокупности данных, находящихся друг с другом в сложных иерархических зависимостях, требует реализации в приёмнике специальных структур [14; 15]. Наиболее распространённые из них: древовидные и матричные структуры – применительно к необходимости хранения структурированных множеств сообщений имеют ряд недостатков. Матричное хранение промежуточных результатов требует дополнительных затрат памяти на хранение повторяющихся элементов множеств. Подобная избыточность затрат внутренней памяти обуславливает выбор древовидной структуры как основы для реализации подсистемы хранения промежуточных результатов [16; 17].

Как показано в [18], вероятность возникновения ошибки определения источника зависит от результатов промежуточных вычислений (числа коллизий в кодах аутентификации блока данных). От числа таких коллизий зависит и сложность формируемых древовидных структур (число ветвей в древовидной структуре, количество блоков данных в ветвях). Таким образом, можно говорить

о том, что формируемая структура промежуточных результатов определяет достоверность определения источника сообщений.

Материалы и методы

В предложенной модели [19] аутентификации сообщений длиной до нескольких байтов с использованием кодирования в режиме сцепления блоков для хранения и обработки сообщений используется древовидная структура, что, в свою очередь, приводит к ряду проблем:

- обработка длинных древовидных структур приводит к большому числу дополнительных вычислений;
- контроль древовидной структуры должен происходить при получении каждого сообщения, что требует дополнительных временных затрат;
- требуется длительное вычисление в случае использования указателей и дополнительные аппаратные затраты на хранение векторов на этапах предобработки древовидной структуры.

Для решения поставленных задач необходимы методы, которые позволяют сигнализировать об ошибке до окончания обработки древовидной структуры при её формировании [20].

В качестве объекта исследования взят алгоритм определения источников сообщений, использующий кодирование в режиме сцепления блоков. Результатами его работы являются формирование в приёмнике последовательностей сообщений и результат проверки условия их принадлежности определённому источнику [5]. В данном методе сравнивается код аутентификации проверяемого сообщения с предварительно сформированной из данных предшествующего сообщения кодовой последовательностью. На основе определения порядка следования сообщений в каждой конкретной паре формируется динамическая структура, представляющая собой ориентированный граф. Пример приведен ниже (рис. 1).

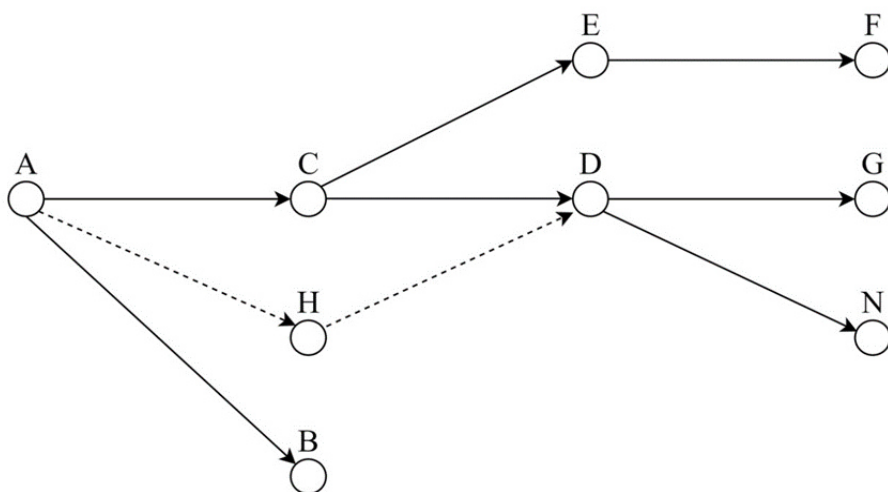


Рис.1. Пример древовидной структуры без ошибки

Fig. 1. Example of a tree structure without an error

Проверка условия возникновения ошибки определения источника происходит после получения последнего сообщения в группе. Предположим, что пришло сообщение Н (рис. 1), содержание полей которого позволит добавить его после А, перед D.

Таким образом, формируются две цепочки, которые могут быть определены как последовательность сообщений от одного источника:

1. А – С – D – G.
2. А – Н – D – G.

В рамках рассматриваемого подхода установить ту, которая сформирована целевым источником, из двух ука-

занных невозможно, поэтому необходимо сформировать сигнал ошибки аутентификации.

Рассматриваемая в [19] модель хранения промежуточных данных, заключающаяся в комбинировании матричного и списочного подхода, имеющая целью повышение скорости их обработки, приводит к формированию древовидной структуры (рис. 2). Обусловлена такая избыточность тем, что на этапе формирования и хранения, а также на завершающем этапе работы алгоритма – этапе анализа – именно такая древовидная структура значительно эффективнее с точки зрения вычислительных затрат, чем структура с альтернативными маршрутами, представленными на рисунке 1.

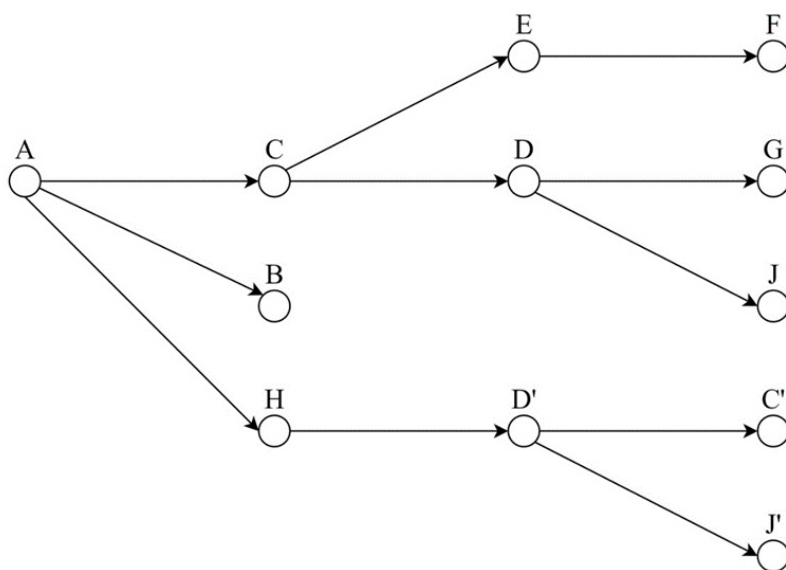


Рис. 2. Пример формирования древовидной структуры с ошибкой

Fig. 2. Example of forming a tree structure with an error

Возникновение ошибки удваивает количество ветвей в древовидной структуре, начиная с позиции, в которой два маршрута ориентированного графа объединились. Таким образом, для ветвей А – С – D – G и А – С – D – J появляются дублирующие их ветви:

1. А – Н – D' – C'.
2. А – Н – D' – J'.

В статье [6] приведена рекуррентная формула для расчета числа ветвей в древовидной структуре при отсутствии ошибок:

$$p_i(k_i) = \sum_{l=0}^{k_i} p_l^{\{1, \dots, \infty\}} p_{k_i-l}^{\langle 0 \rangle},$$

$$p_0(k_0) = \frac{(K \cdot 2^{-H})^{k_0}}{k_0!} e^{-K \cdot 2^{-H}}, \quad (1)$$

где $p_i(k_i)$ – вероятность формирования ровно k_i ветвей в позиции i , начиная с корня дерева; $p_0(k_0)$ – вероятность формирования ровно k_i ветвей в позиции i , начиная с корня дерева; H – размер поля, входящего в состав каждого сообщения и содержащего аутентификационную информацию; K – параметр модели, равный отношению интенсивности поступления сообщений от всех источников к интенсивности поступления сообщений от целевого источника; $p_{k_i-l}^{\langle 0 \rangle}$ – вероятность добавления $k_i - l$ ветвей к каждому сообщению в дереве; $p_l^{\{1, \dots, v\}}$ – вероятность добавления l сообщений к v ветвям, исчисляемая по рекуррентной формуле:

$$p_j^{\{1, \dots, v\}} = \sum_{l=1}^j p_{l-1}^{\{v\}} p_{j-l}^{\{v-1\}}. \quad (2)$$

Вероятность ошибки определения источника $p^{\text{err}}(i)$ после получения i сообщений в данной математической модели определится на основе вероятности возникновения ситуации, проиллюстрированной на рисунке 1:

$$p^{\text{err}}(i) = \sum_{l=1}^{\infty} p_i(l) (1 - 2^{-H})^l. \quad (3)$$

С учётом вероятности возникновения ошибки в позиции $i - 1$ и соответственно удвоения числа ветвей, отходящих от основной последовательности после данной позиции (сообщение D на рис. 1), распределение вероятностей $p'_i(k_i)$ числа ветвей в позиции i будет равно

$$p'_i(k_i) = \sum_{l=0}^{k_i} \left\{ \left[p_l^{\{1, \dots, \infty\}} p_{k_i-l}^{\langle 0 \rangle} \right] \times \right. \\ \left. \times (1 - p^{\text{err}}(i-1)) + p_{\left\lfloor \frac{k_i-l}{2} \right\rfloor}^{\langle 0 \rangle} p^{\text{err}}(i-1) \right\}. \quad (4)$$

Таким образом, мы получаем априорные вероятности ошибки для случаев с возникновением удвоений ветвей (4) и без них (1). Из этих вероятностей по формуле Байеса

$$p_{\text{apost}}^{\text{err}} = \frac{p'_i(k_i)}{p_i(k_i) + p'_i(k_i)}. \quad (5)$$

Сравнивая полученные вероятности, получаем значащие апостериорные вероятности ошибок в зависимости от наблюдаемого числа ветвей на определенных уровнях древовидной структуры.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 3 приведены зависимости числа m узлов определённого уровня (число ветвей) древовидной структуры от уровня n узла (длины последовательности), при котором вероятность ошибки превышает 0,9.

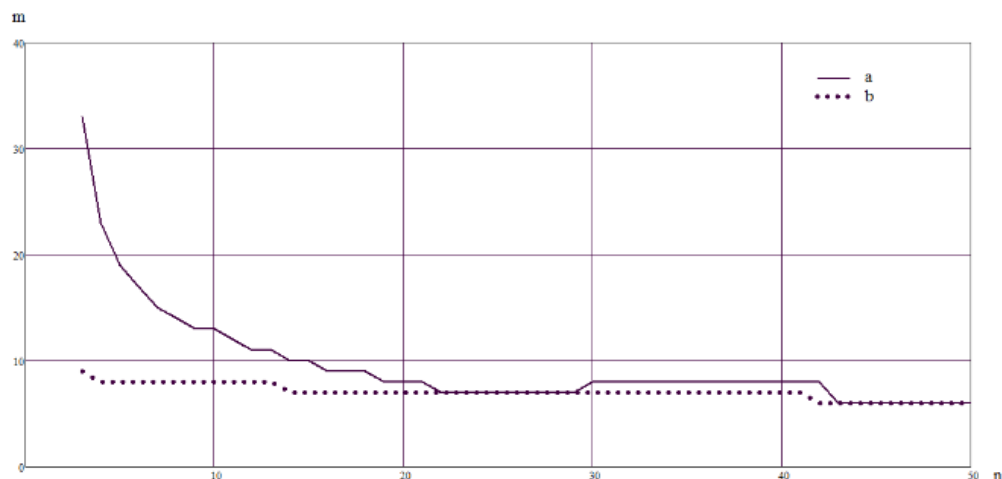


Рис. 3. Границы областей значений длины последовательности сообщений n и числа ветвей древовидной структуры m , при которых вероятность безошибочной идентификации $p_{pl} > 90\%$ при параметре модели $K = 75$ и длине поля, входящего в состав каждого сообщения: а – $H = 7$; б – $H = 9$

Fig. 3. The boundaries of the ranges of values of the length of the message sequence n and the number of branches of the tree structure m , at which the probability of error-free identification of $p_{pl} > 90\%$ with the model parameter $K = 75$ and the length of the field included in each message: а – $H = 7$; б – $H = 9$

Из графика (рис. 3) видно, что с увеличением длины поля H уменьшается количество посторонних ветвей, при которых можно с 90%-ной вероятностью говорить о возникновении ошибки

идентификации источника сообщений. Особенно это заметно в области небольших значений длины последовательности сообщений от целевого источника ($n < 20$).

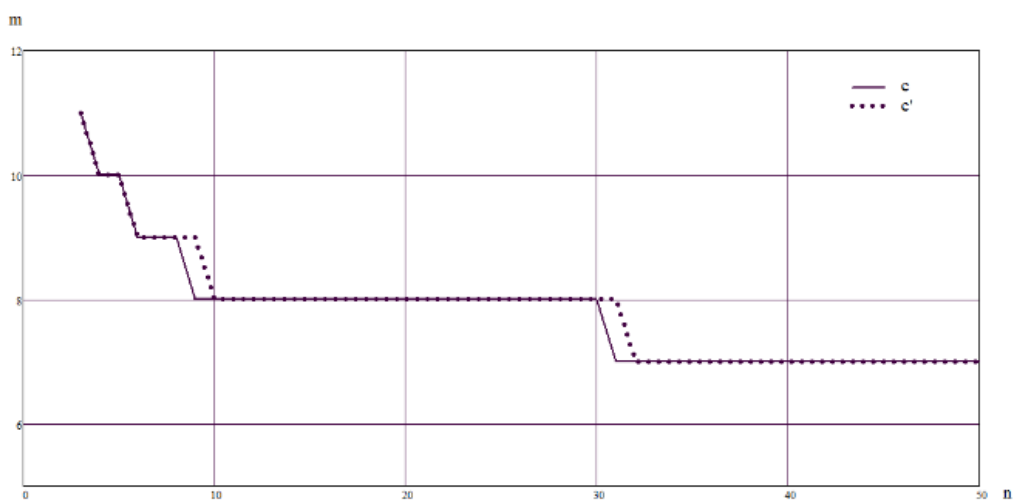


Рис. 4. Границы областей значений длины последовательности сообщений n и числа ветвей древовидной структуры m , при которых вероятность безошибочной идентификации $p_{pl} > 90\%$ при: с – $K = 75$, $H = 8$; с' – $K = 80$, $H = 8$

Fig. 4. The boundaries of the regions of values of the length of the message sequence n and the number of branches of the tree structure m , at which the probability of error-free identification of $p_{pl} > 90\%$ at: с – $K = 75$, $H = 8$; с' – $K = 80$, $H = 8$

Из графика, представленного на рисунке 4, видно, что отношение K интенсивности поступления сообщений от всех источников к интенсивности поступления сообщений от целевого источника не оказывает значимого влияния на размер и расположение на плоскости области, в которой вероятность безошибочной идентификации более 90%.

Выводы

Проведенное исследование показало следующее:

1. Метод определения ошибки может применяться для последовательностей длиной более 20.

2. Для последовательностей меньшей длины, для обнаружения ошибки требуется выполнение соотношения между длиной поля, содержащего аутентификационную информацию, и отношением интенсивностей поступления сообщением от всех источников и от целевого источника: $2^{H-2} > 2$, определенного как целесообразное с точки зрения затрат памяти для хранения элементов древовидной структуры. В то же время при таком соотношении между H и K вероятность формирования $m > 5$ ветвей ничтожно мала (менее 10^{-4}). В этом случае подсчет числа ветвей для обнаружения ошибки проводить нецелесообразно.

3. На основе п. 1 и п. 2 сформулированы критерии применимости рассмат-

риваемого подхода. Для последовательностей, кодированных в режиме сцепления блоков, длиной более 20, при средней интенсивности поступления сообщений в приемник, превышающей интенсивность сообщений от источника не более чем в 2^{H-2} раз, ошибка идентификации обнаруживается с вероятностью более 90% при числе узлов древовидной структуры, обладающих одинаковым уровнем (числе ветвей на определенном расстоянии от корня дерева) больше 8.

В общем случае предложенный подход позволяет реализовывать алгоритмы обнаружения ошибок до этапа анализа древовидной структур, что снижает трудоёмкость процедур идентификации удалённого источника, снижает временные затраты на передачу заведомо ошибочной цепочки, которые были бы необходимы без использования анализа промежуточных структур данных. Наиболее эффективным его применение оказывается при обработке последовательностей большой длины, для которых использование кодирования в режиме сцепления блоков для идентификации источников данных сопряжено с высокими вычислительными затратами. В качестве направлений дальнейших исследований можно отметить разработку алгоритмов поиска дублирующих последовательностей в описанных древовидных структурах, что позволило бы повысить скорость и достоверность обнаружения ошибок идентификации.

Список литературы

1. Hashemipour-Nazari M., Goossens K., Balatsoukas-Stimming A. Multi-Factor Pruning for Recursive Projection-Aggregation Decoding of RM Codes // 2022 IEEE Workshop on Signal Processing Systems (SiPS). Rennes, France, 2022. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/SiPS55645.2022.9919209>.
2. Пат. 2547628 Российская Федерация, H04L 9/32, H04L 12/801. Способ и устройство управления потоками данных распределенной информационной системы / Бухарин В. В., Дворядкин В. В., Пикалов Е. Д., Романюк О. В., Куленич А. И. Ступаков И. Г. Заявл. 05.08.13; опубл. 10.04.15.
3. Мыцко Е. А., Мальчуков А. Н., Иванов С. Д. Исследование алгоритмов вычисления контрольной суммы CRC8 в микропроцессорных системах при дефиците ресурсов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. № 6. С. 22–29.
4. Пат. 1140141 Российская Федерация, A1 SU G08C 19/28. Устройство для приема и обработки избыточной информации / Зубков Ю. П., Ключко В. И., Николаев Ю. И., Петухов В. Е. Устинов Г. Н. Заявл. 27.06.83; опубл. 15.02. 85.
5. Толоманенко Е. А. Дифференциальный анализ трех раундов шифра «Кузнечик» // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2018. Т. 21, № 2. С. 22–26. <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2018-21-2-22-26>.
6. WCCP: A congestion control protocol for wireless multimedia communication in sensor networks / S. M. Aghdam, M. Khansari, H. Rabiee, M. Salehi // Ad Hoc Networks. 2014. Vol. 13. P. 516–534.
7. Bellare M., Kilian J., Rogaway P. The security of the cipher block chaining message authentication code // JCSS. 1994. Vol. 3, N 3. P. 341–358.
8. Black J., Rogaway P. CBC MACs for arbitrary-length messages: The three-key constructions // J. Cryptol. 2005. Vol. 18, N 2. P. 111–131.
9. Stallings W. NIST Block Cipher Modes of Operation for Authentication and Combined Confidentiality and Authentication // Cryptologia. 2010. N 34. P. 225–235.
10. Panos Papadimitratos, Zygmunt J. Haas Secure message transmission in mobile ad hoc networks // Ad Hoc Networks. 2003. N 1(1). P. 193–209.
11. Premkumar P., Shanthi D. Block Level Data Integrity Assurance Using Matrix Dialing Method towards High Performance Data Security on Cloud Storage // Scientific Research Publishing. 2016. Vol. 7, N 11. P. 3626–3644.
12. A real-time motion estimation FPGA architecture / K. Babionitakis, G. A. Doumenis, G. Georgakarakos [et al.] // J. Real-Time Image Proc. 2008. N 3. P. 3–20. <https://doi.org/10.1007/s11554-007-0070-9>.

13. Таныгин М. О., Чеснокова А. А., Ахмад А. А. А. Повышение скорости определения источника сообщений за счет ограничения множества обрабатываемых блоков данных // Труды МАИ. 2022. № 125. <https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-20>.
14. Черемисинов Д. И., Черемисинова Л. Д. Задачи обработки больших графов (graph mining) // Big Data and Advanced Analytics. 2019. № 5. С. 328–333.
15. Колганов А. С. Параллельная реализация алгоритма поиска минимальных остовных деревьев с использованием центрального и графического процессоров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2016. Т. 5, № 3. С. 5–19. <https://doi.org/10.14529/cmse160301>.
16. Tasci S., Demirbas M. Employing in-memory data grids for distributed graph processing // IEEE 2015 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). Santa Clara, CA, USA: IEEE, 2015. P. 1856–1864. <https://doi.org/10.1109/bigdata.2015.7363959>.
17. Paradies M., Lehner W., Bornhövd C. GRAPHITE: an extensible graph traversal framework for relational database management systems // Proceedings of the 27th International Conference on Scientific and Statistical Database Management. New York, United States: Association for Computing Machinery, 2015. P. 1–15. <https://doi.org/10.1145/2791347.2791383>.
18. Повышение скорости обнаружения ошибок при формировании цепочек блоков данных на основе анализа числа совпадений хешей / М. О. Таныгин, Е. А. Кулешова, А. В. Митрофанов, Е. Ю. Гладилина // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2022. № 1(57). С. 85–93. https://doi.org/10.54398/2074-1707_2022_1_85.
19. Метод ограничения множества обрабатываемых приёмником блоков данных для повышения достоверности операций определения их источника / М. О. Таныгин, О. Г. Добросердов, А. О. Власова, А. А. Ахмад // Труды МАИ. 2021. Т. 118, № 3. С. 15. <https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-14>.
20. Таныгин М. О., Чеснокова А., Ахмад А. А. А. Снижение ресурсных затрат на обработку кодов аутентификации сообщений за счет ограничения числа обрабатываемых сообщений // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2022. № 4(60). С. 22–29.

References

1. Hashemipour-Nazari M., Goossens K., Balatsoukas-Stimming A. Multi-Factor Pruning for Recursive Projection-Aggregation Decoding of RM Codes. 2022 IEEE Workshop on Signal Processing Systems (SiPS). Rennes, France, 2022, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/SiPS55645.2022.9919209>

2. Bukharin V. V., e. a. Sposob i ustrojstvo upravleniya potokami dannyh raspredelennoj informacionnoj sistemy [Method and device for controlling data flows of a distributed information system]. Patent RF, no. 2547628, 2015.
3. Mytsko E. A., Malchukov A. N., Ivanov S. D. Issledovanie algoritmov vychisleniya kontrol'noj summy CRC8 v mikroprocessornyh sistemah pri deficite resursov [Investigation of algorithms for calculating the CRC8 checksum in microprocessor systems with a shortage of resources]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Devices and Systems. Management, Control, Diagnostics*, 2018, no. 6, pp. 22–29.
4. Zubkov Yu. P., e. a. Ustrojstvo dlya priema i obrabotki izbytochnoj informacii [Device for receiving and processing redundant information]. Patent RF, no. 1140141, 2015.
5. Tolomanenko E. A. Differencial'nyj analiz trekh raundov shifra "Kuznechik" [Differential analysis of three rounds of the cipher "Grasshopper"]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2018, vol. 21, no. 2, pp. 22–26. <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2018-21-2-22-26>
6. Aghdam S. M., Khansari M., Rabiee H., Salehi M. WCCP: A congestion control protocol for wireless multimedia communication in sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2014, vol. 13, pp. 516–534.
7. Bellare M., Kilian J., Rogaway P. The security of the cipher block chaining message authentication code. *JCSS*, 1994, vol. 3, no. 3, pp. 341–358.
8. Black J., Rogaway P. CBC MACs for arbitrary-length messages: The three-key constructions. *J. Cryptol*, 2005, vol. 18, no. 2, pp. 111–131.
9. Stallings W. NIST Block Cipher Modes of Operation for Authentication and Combined Confidentiality and Authentication. *Cryptologia*, 2010, no. 34, pp. 225–235.
10. Panos Papadimitratos, Zygmunt J. Haas Secure message transmission in mobile ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 2003, no. 1, pp. 193–209.
11. Premkumar P., Shanthi D. Block Level Data Integrity Assurance Using Matrix Dialing Method towards High Performance Data Security on Cloud Storage. *Scientific Research Publishing*, 2016, vol. 7(11), pp. 3626–3644.
12. Babionitakis K., Doumenis G. A., Georgakarakos, G. eds. A real-time motion estimation FPGA architecture. *J. Real-Time Image Proc.*, 2008, no. 3, pp. 3–20. <https://doi.org/10.1007/s11554-007-0070-9>
13. Tanygin M. O., Chesnokova A. A., Ahmad A. A. A. Povyshenie skorosti opredeleniya istochnika soobshchenij za schet ogranicheniya mnozhestva obrabatyvaemykh blokov dannyh [Increasing the speed of determining the source of messages by limiting the set of processed data blocks]. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*, 2022, no. 125. <https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-20>

14. Cheremisinov D. I., Cheremisinova L. D. Zadachi obrabotki bol'shih grafov (graph mining) [Tasks of processing large graphs (graph mining)]. *Big Data and Advanced Analytics*, 2019, no. 5, pp. 328–333.

15. Kolganov A. S. Parallel'naya realizaciya algoritma poiska minimal'nyh ostovnyh derev'ev s ispol'zovaniem central'nogo i graficheskogo processorov [Parallel implementation of the algorithm for finding minimum threshold values using centralized and graphical processes]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika = Bulletin of the South Ural University. Series: Computational Mathematics and Computer Science*, 2016, vol. 5, no. 3, pp. 5–19. <https://doi.org/10.14529/cmse160301>

16. Tasci S., Demirbas M. Employing in-memory data grids for distributed graph processing // IEEE 2015 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). Santa Clara, CA, USA, IEEE Publ., 2015, pp. 1856–1864. <https://doi.org/10.1109/bigdata.2015.7363959>

17. Paradies M., Lehner W., Bornhövd C. GRAPHITE: an extensible graph traversal framework for relational database management systems. Proceedings of the 27th International Conference on Scientific and Statistical Database Management. New York, United States, Association for Computing Machinery Publ., 2015, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1145/2791347.2791383>

18. Tanygin M. O., Kuleshova E. A., Mitrofanov A. V., Gladilina E. Y. Povyshenie skorosti obnaruzheniya oshibok pri formirovanii cepochek blokov dannyh na osnove analiza chisla sovpadenij heshej [Increasing the speed of error detection in the formation of data block chains based on the analysis of the number of hash matches]. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2022, no. 1(57), pp. 85–93. https://doi.org/10.54398/2074-1707_2022_1_85

19. Tanygin M. O., Dobroserdov O. G., Vlasova A. O., Ahmad A. A. Metod ograničeniya mnozhestva obrabatyvaemyh priyomnikom blokov dannyh dlya povysheniya dostovernosti operacij opredeleniya ih istochnika [Method of limiting the set of data blocks processed by the receiver to increase the reliability of operations for determining their source]. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*, 2021, vol. 118, no. 3, p. 15. <https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-14>

20. Tanygin M. O., Chesnokova A. A., Akhmad A. A. A. Snizhenie resursnyh zatrat na obrabotku kodov autentifikacii soobshchenij za schet ograničeniya chisla obrabatyvaemyh soobshchenij [Reduction of resource costs for processing message authentication codes by limiting the number of processed messages]. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2022, no. 4(60), pp. 22–29.

Информация об авторе / Information about the Author

Чеснокова Алина Андреевна, ассистент
кафедры информационной безопасности,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: chesnokova.50@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-1183-4572

Alina A. Chesnokova, Assistant
of the Department of Information Security,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: chesnokova.50@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-1183-4572

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-135-145>

УДК 004.451

Использование метапрограммных средств языка Common Lisp для разработки систем эмуляторов

А. А. Чаплыгин¹ ✉

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

✉ e-mail: alex_chaplygin@mail.ru

Резюме

Цель исследования заключается в анализе и использовании метапрограммирования на языке Common Lisp при проектировании и реализации эмуляторов, симулирующих аппаратуру вычислительных систем. Рассматриваются виды метапрограммирования, макросредства языка Common Lisp, использование макросов для метапрограммирования.

Методы. Язык Lisp характеризуется использованием единообразных S-выражений для представления данных и программ. Таким образом, данные могут являться частью программы, и наоборот: программа может быть данными. Макросредства Common Lisp позволяют напрямую модифицировать абстрактное синтаксическое дерево программы, и возможно создание новых синтаксических конструкций для решения поставленной задачи. При реализации функций эмулятора макросредства языка Common Lisp могут быть использованы для генерации функций, где общая часть функций входит в макрос, а различия функций задаются в параметрах при вызове макросов. Примеры таких макросов включают работу с битовыми регистрами регистра, генерацию арифметических команд, команду сравнения, работу с памятью и др. Таким образом, можно значительно уменьшить размер программы.

Результаты. В результате компьютерного моделирования был разработан и реализован симулятор архитектуры NES (процессор MOS 6502) на объектно-ориентированном языке программирования C# и на языке с поддержкой метапрограммирования Common Lisp. В результате симулятор, написанный на языке с поддержкой метапрограммирования, оказался более чем в 2 раза меньше, чем симулятор, написанный на языке C#.

Заключение. Использование метапрограммирования (на примере создания эмуляторов) может значительно сократить объем программы, упростить и улучшить архитектуру программы, уменьшить число ошибок и повысить качество программ. Использование предметно-ориентированных языков позволяет существенно сократить объем кода программы.

Ключевые слова: метапрограммирование; макрос; Common Lisp; эмулятор; макроподстановка; предметно-ориентированное программирование.

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

Для цитирования: Чаплыгин А. А. Использование метапрограммных средств языка Common Lisp для разработки систем эмуляторов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 3. С. 135–145. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-135-145>.

Поступила в редакцию 11.07.2023

Подписана в печать 08.08.2023

Опубликована 29.09.2023

© Чаплыгин А. А., 2023

Using Metaprogramming Tools of the Common Lisp Language for the Development of Emulator Systems

Aleksandr A. Chaplygin¹✉

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

✉ e-mail: alex_chaplygin@mail.ru

Abstract

The purpose of research is to analyze and use metaprogramming in the Common Lisp language when designing and implementing emulators that simulate computer system hardware. The metaprogramming, the macro tools of the Common Lisp language and the use of macros for metaprogramming are considered.

Methods. The Lisp language is characterized by its use of uniform S-expressions to represent data and programs. Thus, data can be part of a program and vice versa: a program can be data. Common Lisp macro tools allow you to directly modify the abstract syntax tree of a program, and thus it is possible to create new syntactic constructs to solve a given problem. When implementing emulator functions, macro tools of the Common Lisp language can be used to generate functions, where the common part of the functions is included in the macro, and the differences between the functions are specified in the parameters when calling the macros. Examples of this macros are: bit status register macros, generation of arithmetic commands, comparison commands, memory commands. Using that you can significantly reduce the size of the program.

Results. As a result of computer modeling, a simulator of the NES architecture (MOS 6502 processor) was developed and implemented in the conventional object-oriented C# programming language and in the Common Lisp metaprogramming language. As a result, the simulator written in a language with metaprogramming support turned out to be more than 2 times smaller than the simulator written in C#.

Conclusion. The use of metaprogramming (using the example of creating emulators) can significantly reduce the size of a program, simplify and improve the program architecture, reduce the number of errors and improve the quality of programs. The use of domain specific languages lets reduce code size even more.

Keywords: metaprogramming; macro; Common Lisp; emulator; macro substitution; domain specific languages.

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

For citation: Chaplygin A. A. Using Metaprogramming Tools of the Common Lisp Language for the Development of Emulator Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(3): 135–145. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-135-145>.

Received 11.07.2023

Accepted 08.08.2023

Published 29.09.2023

Введение

Метапрограммирование [1; 2] – это техника программирования, при которой компьютерные программы могут

рассматривать другие программы как данные, т. е. читать, генерировать, анализировать или преобразовывать другие

программы. Во многих случаях это позволяет минимизировать число строк кода для решения задачи, соответственно сокращая время разработки. Также это дает гибкость программам, чтобы обрабатывать новые ситуации без перекомпиляции.

Существует три подхода к реализации метапрограммирования. Первый подход – это использование прикладного программного интерфейса (API), с помощью которого предоставляется доступ к внутренним объектам среды времени выполнения [3; 4]. Этот подход используется при генерации промежуточного языка в среде .NET. В языке C# присутствует инкрементальный компилятор, т. е. программа может модифицироваться во время выполнения.

Второй подход метапрограммирования – динамическое выполнение программных выражений в виде строк или других объектов (JavaScript). Это позволяет программе генерировать код и выполнять его очень быстро [5; 6; 7]. При этом следует отметить, что внутренний язык может отличаться от внешнего.

Третий подход заключается в применении компилятора как универсальной системы преобразования кода программы с использованием описаний преобразований. Это дает возможность использовать метапрограммирование с практически любыми целевыми языками, даже с теми, которые не имеют средств метапрограммирования. Впервые этот подход был реализован в языке Scheme [8].

Одно из важных применений метапрограммирования – это предметно-ориентированные языки [9; 10; 11]. Для реализации предметно-ориентированного языка используются генераторы лексических и синтаксических анализаторов. В этом случае язык описывается с помощью регулярных выражений и контекстно-свободных грамматик. Сгенерированная программа эффективно разбирает язык, используя сложные алгоритмы.

Другое применение метапрограммирования – динамический анализ программ [12]. Это включает модульное тестирование, отладку, измерение метрик.

Использование метапрограммирования требует повышенных навыков по сравнению с обычным программированием [13]. Так как метапрограммирование предоставляет большую гибкость и настраиваемость, то любая неточность или некорректное использование может привести к неожиданным ошибкам, которые очень сложно отладить. Это приводит к рискам при разработке и уменьшает надежность при неаккуратном использовании методов метапрограммирования. Поэтому эти методы используют в основном опытные разработчики.

Язык Лисп [14; 15] был первым языком, который позволял обрабатывать программу как код. Он использовал списки как основную структуру данных. Также Лисп обладал свойством гомеоморфности, т. е. текст программы имеет такую же структуру, что и абстрактное синтаксическое дерево, и программа

есть объект данных первого класса. Оператор «цитирование» использовался, чтобы отложить вычисление до времени выполнения. Таким образом, метаязык в Лиспе совпадает с родительским языком, что позволяет расширять уже существующие подпрограммы. Лисп применялся для создания приложений с искусственным интеллектом. Также он получил широкое распространение в системах автоматизированного проектирования [16].

Язык Scheme позволяет определять так называемые гигиенические макросы. Эти макросы гарантируют отсутствие случайных совпадений идентификаторов при раскрытии.

Язык Common Lisp [17; 18; 19] – диалект языка Лисп, который был опубликован как стандарт ANSI. Это язык общего назначения, который представляет собой комбинацию процедурной, функциональной и объектно-ориентированной парадигм. Так как он является динамическим языком, то он поощряет эволюционную и инкрементальную разработку программ с эффективной компиляцией. Важной особенностью Common Lisp является инкрементальная разработка без прерывания работы программы, т. е. добавление и модификация кода работающей программы.

Разработка систем эмуляторов [20] компьютеров требует тщательного проектирования всех подсистем: центрального процессора, памяти, шины, видеоадаптера. Если происходит эмуляция настоящего оборудования, а не виртуального, то разработчик сталкивается с

большим объемом информации и с большой сложностью поведения реальной аппаратуры. Это приводит к большой сложности программной системы и, следовательно, к большому объему исходного кода. Использование методов метапрограммирования позволяет значительно уменьшить сложность и объем исходного кода программной системы при разработке систем эмуляторов. Язык Common Lisp обладает развитыми средствами метапрограммирования, в частности развитой системой макросов. Эти макросы могут быть использованы для реализации предметно-ориентированного встроенного языка описания поведения компонентов эмулятора, и таким образом, упростить и уменьшить программный код.

Материалы и методы

Наиболее распространенный способ метапрограммирования в Common Lisp заключается в написании макросов. Макрос – это оператор, который реализуется через трансформацию. При определении макросов мы указываем, каким образом необходимо выполнить преобразование. Само преобразование выполняется компилятором, – это есть раскрытие макроса. Например макрос (1):

```
(defmacro nil! (x)
  (list 'setf x nil))
```

при вызове (2):

```
(nil! a)
```

будет преобразован в (3):

```
(setf a nil)
```

и лишь затем скомпилирован и вычислен.

В макросах мы можем указывать, какую часть абстрактного синтаксического дерева нужно преобразовывать и каким образом. Например, заменить на параметр макроса, или выполнить предварительные вычисления, или вставить несколько параметров как список. Отличие макросов от функций заключается в управлении порядком вычислений, т. е. можно задавать, в какой последовательности будут вычисляться параметры и части кода макроса, а в функции аргументы всегда вычисляются перед вызовом функции. На языке Common Lisp для этого используется обратная кавычка (как оператор предотвращения вычислений) и операторы «запятая» (указание подстановки символа) и «запятая-at» (указание подстановки списка). Например макрос цикла с предусловием можно реализовать таким образом (4):

```
(defmacro while (test &rest body) (4)
  `(do ()
      ((not ,test))
      ,@body))
```

Здесь сначала тело цикла (остаточный параметр body) собирается внутри списка, этот список вместе с условием test вставляется внутрь макроса, а затем будет выполнен оператор цикла do.

```
(make «zero» 1) (5)
```

приводит к генерации функций (6), (7), (8):

```
(defun get-zero () (6)
```

```
(ash (logand ST (ash 1 1)) (- 0 1)))
```

```
(defun set-zero () (7)
```

```
(setf ST (logior ST (ash 1 1))))
```

```
(defun clear-zero () (8)
```

```
(setf ST (logand ST (lognot (ash 1 1))))))
```

Макрос может быть раскрыт в другой макровывоз. Если компилятор встречает такой макровывоз, то он раскрывает его до тех пор, пока не останется ни одного макроса.

Эмулятор вычислительного устройства состоит обычно из следующих компонентов: центральный процессор, память, устройства ввода-вывода. Каждый из этих компонент является достаточно сложным в устройстве и в поведении, поэтому необходим индивидуальный подход при проектировании данных компонентов.

Центральный процессор включает в себя регистры. Это ячейки памяти для вычислений. Их моделирование реализуется достаточно просто, за исключением регистра флагов. Здесь данные хранятся в индивидуальных битах, каждый – на своей позиции. Чтобы извлечь или установить бит, необходимо использовать несколько побитовых операций, а так как обращение к флагам происходит очень часто, например после каждой арифметической операции, то получается много повторений одного и того же кода. С помощью макросов мы можем сгенерировать все необходимые функции (чтение флага, установка флага, сброс флага) для каждого флага.

Например, макровывоз (5):

При реализации логических побитовых команд возникает повторяющийся код. Например, команды AND (побитовое И), EOR (исключающее ИЛИ), ORA (побитовое ИЛИ) проводят следующие действия:

- применяют логическую функцию к содержимому аккумулятора и операнда, записывая результат в аккумулятор;
- устанавливают флаги нуля и знака;
- вычисляют дополнительный цикл процессора.

Эти повторы кода можно заменить, используя макрос, в котором в нужное место для вычисления подставится соответствующая логическая функция, таким образом, после макроподстановки создаются необходимые функции.

(defmacro make-br (fun flag res) (9)

"Команды условного перехода" ; fun – имя генерируемой функции

; flag – какой флаг анализируется

; res – значение флага для перехода

`(defun ,fun (adr)

(let ((op (to-signed (mem:rd adr)))) ; чтение операнда

(when (= (,flag) ,res) ; условие выполнения перехода

(setf add-cycle (+ 1 (is-cross PC op))) ; счетчик циклов процессора

(setf PC (+ PC op)))) ; выполнение перехода

Тогда команды переходов генерируются следующим образом (10) – (17):

(make-br BCC |get-carry| 0) ;Переход если нет переноса (10)

(make-br BCS |get-carry| 1) ;Переход если перенос (11)

(make-br BEQ |get-zero| 1) ;Переход если равно (12)

(make-br BNE |get-zero| 0) ;Переход если не равно (13)

(make-br BMI |get-neg| 1) ;Переход если меньше (14)

(make-br BPL |get-neg| 0) ;Переход если больше (15)

(make-br BVC |get-over| 0) ;Переход если не переполнение (16)

(make-br BVS |get-over| 1) ;Переход если переполнение (17)

Другие функции, которые можно сгенерировать при помощи макросов:

- операции сдвигов (различие в направлениях и обработке флагов);
- операции условных переходов (различаются условиями по состояниям флагов);
- операции сравнения (используют разные регистры);
- операции уменьшения / увеличения регистров;
- операции загрузки из памяти (используют разные регистры);
- генерация таблицы кодов и операций.

Например, для операций условных переходов можно сделать следующий макрос (9):

В результате созданы функции: BCC, BCS, BEQ, BNE, BMI, BPL, BVC, BVS. Нет необходимости дублировать повторяющийся код программы.

Результаты и их обсуждение

В качестве эмулятора для реализации был выбран эмулятор NES (процессор MOS 6502). Он был реализован на объектно-ориентированном языке программирования (C#) и с помощью метапрограммирования (язык Common Lisp). Оба варианта реализуют одинаковые функции эмулятора.

Система NES включает в себя следующие подсистемы:

- центральный процессор;
- оперативная память (адресное пространство);
- постоянная память;
- система ввода-вывода;
- графическая подсистема.

Центральный процессор MOS 6502 имеет более 150 инструкций, из которых уникальных команд около 50, различия заключаются в видах адресации. На

обычном языке программирования приходится реализовывать все 150 инструкций, а с помощью метапрограммирования число функций меньше 50, потому что многие команды имеют общие части, которые могут быть перенесены в макросы.

Адресное пространство NES состоит из оперативной памяти, стека, постоянной памяти, отображенных в память регистров ввода вывода и видео. Метапрограммирование позволяет создать таблицу диапазонов адресов и перенаправить операции чтения и записи в память в соответствующие модули.

Постоянная память NES имеет переключающиеся банки. С помощью макросов легко создать необходимые функции по записи данных в нужные области памяти.

Видеоподсистема имеет свой набор регистров, работу с которыми также упрощается при помощи макросов (установка индивидуальных битов).

Результаты реализации показаны в таблице 1.

Таблица 1. Результаты реализации системы NES на объектно-ориентированном языке и с помощью метапрограммирования

Table 1. Results of NES system implementation in object-oriented language and in metaprogramming language

Подсистема	Число строк на языке C#	Число строк на языке Common Lisp	Коэффициент (отношение)
Центральный процессор	1396	543	2,57
Постоянная память	185	66	2,80
Ввод — вывод	56	26	2,15
Память	230	72	3,19
Графический процессор	894	540	1,56
Главная программа	135	38	3,55
Переключение банков	229	91	2,52
Всего	3250	1404	2,31

Анализ проведенных исследований свидетельствует о том, что программа, созданная при помощи метапрограммирования, сократилась по объему программного кода в два раза по сравнению с программой, написанной традиционным способом (объектно-ориентированное программирование).

Выводы

Таким образом, метапрограммирование позволяет существенно сократить объем программы. Это влияет на скорость разработки: скорость разработки значительно повышается. Меньший объем программы – это упрощение программы, улучшение ее архитектуры, а значит, и меньшее количество ошибок, повышенное качество. Метапрограммирование может быть успешно применено не только при написании систем эмуляторов, но и в других прикладных областях.

В качестве недостатков метапрограммирования следует отметить уменьшение скорости работы программы, вызванное необходимостью выполнять преобразование и подстановку макрофункций, а также динамической типизацией данных. Эти недостатки могут быть нивелированы с помощью указаний типов для функций и непосредственной (inline) подстановкой макросов и функций (поддерживается в Common Lisp).

Дальнейшее развитие идей метапрограммирования заключается в применении предметно-ориентированных языков. Они позволяют существеннее упростить программный код за счет использования макрофункций, напрямую отражающих и отображающих предметную область. Предметно-ориентированное программирование – это область дальнейших исследований.

Список литературы

1. Ingebrigtsen E. Metaprogramming in C#. Birmingham, UK: Packt Publishing Limited, 2023. 353 p.
2. Лоторейчик В. Ю. Метапрограммирование на основе текстового препроцессора // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2006. № 25. С. 57–65. EDN JURWLF.
3. What APIs Are and Why They Matter. URL: <https://www.f5.com/labs/articles/education/still-mystified-by-apis-what-they-are-really-and-why-they-matter> (дата обращения: 26.05.2022).
4. Аникин Д. А. Анализ методов авторизации и аутентификации REST API // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2023. Т. 8, № 5-2(31). С. 120–124. EDN DZKSMQ.
5. Денисов Д. Э. Сравнение Typescript и Javascript для web-разработки // Студенческий вестник. 2023. № 20-8(259). С. 57–58. EDN MQCOML.

6. Назарова О. В. Интерактивный учебник по Java Script // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов. Наука и образование. 2017. № 7(98). С. 63. EDN ZRRDGB.
7. Скотт Адам Д., Макдоналд М., Пауэрс Шелли. JavaScript. Рецепты для разработчиков. 3-е изд. СПб.: Питер, 2023. 528 с.
8. Абельсон Х., Сассман Д. Структура и интерпретация компьютерных программ. М.: Добросвет: КДУ, 2012.
9. Эванс Э. Предметно-ориентированное проектирование (DDD). Структуризация сложных программных систем. М.: Вильямс, 2020. 448 с.
10. Сухов А. О. Классификация предметно-ориентированных языков и языковых инструментариев // Математика программных систем: межвузовский сборник научных статей / под редакцией А. И. Микова и Л. Н. Лядовой. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2012. С. 74–83. EDN TOFMPJ.
11. Fowler M. Domain Specific Language. URL: <http://gnetna.com/books/Domain-Specific%20Languages.pdf> (дата обращения: 25.05.2023).
12. Тихонов А. Ю., Аветисян А. И. Комбинированный (статический и динамический) анализ бинарного кода // Труды Института системного программирования РАН. 2012. Т. 22. С. 131–152.
13. Davide Di Gennaro. Advanced Metaprogramming in Classic C++. Berkeley, CA: Apress, 2015. 572 p.
14. McCarthy John. Recursive Functions of Symbolic Expressions and Their Computation by Machine, Part I // Communications of the ACM. 1960. Vol. 3, N 4. P. 184–195.
15. Domkin V. Programming Algorithms in Lisp. Berkeley, CA: Apress, 2021. 392 p.
16. Сосновский Е. И. Использование языка программирования LISP для расширения базовых возможностей бюджетных САПР // Новые компьютерные технологии. 2012. Т. 10, № 1(10). С. 55–59. EDN WHKGLD.
17. Graham P. ANSI Common LISP. Philadelphia, USA: Pearson, 1995. 448 p.
18. Рапортиренко А. М. Common Lisp версия системы компьютерной алгебры REDUCE // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Математика, информатика, физика. 2010. № 2-2. С. 40–44. EDN MQIMWJ.
19. Сайбель П. Практическое использование Common Lisp. М.: ДМК Пресс, 2023. 488 с.
20. Трещев И., Кожин И. Эмуляторы и симуляторы сетей ЭВМ. Для студентов технических специальностей. М.: Ридеро, 2018. 166 с.

References

1. Ingebrigtsen E. Metaprogramming in C#. Birmingham, UK, Packt Publishing Limited, 2023. 353 p.
2. Lotoreychik V. Y. Metaprogrammirovaniye na osnove tekstovogo preprocessora [Metaprogramming based on word processor]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki* = *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2006, no. 25, pp. 57–65. EDN JURWLF
3. What APIs Are and Why They Matter. Available at: <https://www.f5.com/labs/articles/education/still-mystified-by-apis-what-they-are-really-and-why-they-matter>. (accessed 26.05.2022)
4. Anikin D. A. Analiz metodov avtorizacii i autentifikacii REST API [Analysis of REST API authorization and authentication methods REST API]. *Mezhdunarodnyj Zhurnal Informacionnyh Tekhnologij i Energoeffektivnosti* = *International Journal of Information Technologies and Energy*, 2023, vol. 8, no. 5-2(31), pp. 120–124. EDN DZKSMQ
5. Denisov D. Sravnenie Typescript i Javascript dlya web-razrabotki [Comparison of typescript and javascript for web development]. *Studencheskij vestnik* = *Student Bulletin*, 2023, no. 20-8(259), pp. 57–58. EDN MQCOML
6. Nazarova O. V. Interaktivnyj uchebnik po Java Script [Interactive JavaScript toolbox]. *Hroniki ob"edinennogo fonda elektronnyh resursov. Nauka i obrazovanie* = *United Fond of Electronic Resources Chronicles: Science and Aducation*, 2017, no. 7(98), p. 63. EDN ZRRDGB
7. Skott Adam D., Makdonald M., Pauers Shelli. JavaScript. Recepty dlya razrabotchikov [JavaScript Cookbook: Programming the Web]. 3rd ed. St. Petersburg, Peter Publ., 2023. 528 p.
8. Abelson H., Sussman D. Struktura i interpretaciya komp'yuternyh programm [Structure and Interpretation of Computer Programs]. Moscow, Dobrosvet, KDU Publ., 2012. 608 p.
9. Evans E. Predmetno-orientirovannoe proektirovanie (DDD). Strukturizaciya slozhnyh programmnyh system [Subject-oriented design (Domain Driven Development). Structuring of complex software systems]. Moscow, Villiams Publ., 2020. 448 p.
10. Suhov A. O. [Classifiacion of domain specific languages and meanings]. *Matematika programmnyh system. Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh statej* [Mathematics of software systems. Interuniversity collection of scientific articles]; ed. by A. I. Mikov and L. N. Lyadova. Perm, Perm State National Research University Publ., 2012, pp. 74–83. (In Russ.). EDN TOFMPJ
11. Fowler M. Domain Specific Language Available at: <http://gnetna.com/books/Domain-Specific%20Languages.pdf>. (accessed 25.05.2023)

12. Tihonov A. Y. Kombinirovannyj (staticheskiy i dinamicheskiy) analiz binarnogo koda [Combined static and dynamic binary code analysis]. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN = Issues of ISP RAN*, 2012, vol. 22, pp. 131–152.
13. Davide Di Gennaro. *Advanced Metaprogramming in Classic C++*. Berkeley, CA, Apress, 2015. 572 p.
14. McCarthy John. Recursive Functions of Symbolic Expressions and Their Computation by Machine, Part I. *Communications of the ACM*, 1960, vol. 3, no. 4, pp. 184–195.
15. Domkin V. *Programming Algorithms in Lisp*. Berkeley, CA, Apress, 2021. 392 p.
16. Sosnovsky E. I. Ispol'zovanie yazyka programmirovaniya LISP dlya rasshireniya bazovyh vozmozhnostej byudzhetnyh SAPR [Using Lisp language for adjusting CAD base functions]. *Novye komp'yuternye tekhnologii = New Computer Technologies*, 2012, vol. 10, no. 1(10), pp. 55–59. EDN WHKGLD
17. Graham P. *ANSI Common LISP*. Philadelphia, USA, Pearson Publ., 1995. 448 p.
18. Raportirenko A. M. Common Lisp versiya sistemy komp'yuternoj algebry REDUCE [Common Lisp version of REDUCE computer algebra system]. *Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Matematika, informatika, fizika = Bulletin of Russian Peoples' Friendship University. Series: Mathematics, Information Sciences and Physics*, 2010, no. 2-2, pp. 40–44. EDN MQIMWJ
19. Sibel P. *Prakticheskoe ispol'zovanie Common Lisp [Practical Common Lisp]*. Moscow, DMK Press Publ., 2023. 488 p.
20. Treshchev I., Kozhin I. *Emulyatory i simulyatory setej EVM. Dlya studentov tekhnicheskikh special'nostej [Emulators and simulators of computer networks. For technical students]*. Moscow, Ridero Publ., 2018. 166 p.

Информация об авторе / Information about the Author

Чаплыгин Александр Александрович,
кандидат технических наук, доцент кафедры
программной инженерии, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: alex_chaplygin@mail.ru,
ORCID: 0009-0009-8739-2695

Aleksandr A. Chaplygin, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor
of the Department of Software Engineering,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: alex_chaplygin@mail.ru,
ORCID: 0009-0009-8739-2695

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-146-163>

УДК 681.3.06

Метод построения нечеткой когнитивной карты конкурентоспособности машиностроительного предприятия

И. А. Буйневич¹, Ю. А. Криушина¹, Ю. А. Халин¹✉,
А. И. Катыхин¹, Е. А. Криушин¹

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

✉ e-mail: yur-khalin@yandex.ru

Резюме

Цель исследования – оценить факторы, влияющие на конкурентоспособность машиностроительных предприятий, и разработать методику нечеткой когнитивной карты (НKK) для их анализа.

Методы. В данном исследовании были использованы методы анализа данных и моделирования, включая метод НKK для формализации взаимосвязей между факторами и их влияния на конкурентоспособность машиностроительных предприятий. Были проанализированы данные, связанные с факторами, влияющими на конкурентоспособность, включая технологический уровень, качество продукции, уровень цен, инновационный потенциал и управленческий опыт.

Результаты. В результате исследования была разработана методика НKK для анализа взаимосвязей между факторами и их влияния на конкурентоспособность машиностроительных предприятий. Была проведена оценка факторов, влияющих на конкурентоспособность, включая технологический уровень, качество продукции, уровень цен, инновационный потенциал и управленческий опыт. Были выявлены ключевые факторы, оказывающие наибольшее влияние на конкурентоспособность машиностроительных предприятий, а также установлены степени влияния каждого фактора на конкурентоспособность, используя шкалу для формализации силы влияния.

Заключение. В итоге результаты исследования показали, что метод НKK является эффективным инструментом для анализа конкурентоспособности машиностроительных предприятий. Он позволяет учитывать неопределенность и нечеткость входных данных и лучше понимать взаимосвязи между концептуальными переменными. Разработанная методика НKK может быть использована для принятия обоснованных решений по улучшению конкурентоспособности предприятия. В целом исследование подтверждает важность анализа факторов, влияющих на конкурентоспособность, и показывает, что НKK может помочь представить сложную систему и ее связи в более наглядной и понятной форме. Это может быть полезно для руководства предприятия в принятии обоснованных решений по улучшению конкурентоспособности компании и увеличению ее доли на рынке.

Ключевые слова: нечеткая когнитивная карта; метод НKK; конкурентоспособность; машиностроительное предприятие; анализ; взаимосвязи переменных; неопределенность; нечеткость; принятие решений.

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

© Буйневич И. А., Криушина Ю. А., Халин Ю. А., Катыхин А. И., Криушин Е. А., 2023

Для цитирования: Метод построения нечеткой когнитивной карты конкурентоспособности машиностроительного предприятия / И. А. Буйневич, Ю. А. Криушина, Ю. А. Халин, А. И. Катыхин, Е. А. Криушин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 3. С. 146–163. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-146-163>.

Поступила в редакцию 10.07.2023

Подписана в печать 08.08.2023

Опубликована 29.09.2023

Method of Construction of a Fuzzy Cognitive Map of the Competitiveness of a Machine-Building Enterprise

Irina A. Buinevich¹, Yulia A. Kriushina¹, Yuri A. Khalin¹✉,
Alexander I. Katykhin¹, Evgeniy A. Kriushin¹

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

✉ e-mail: yur-khalin@yandex.ru

Abstract

The purpose of research is to evaluate the factors influencing the competitiveness of machine-building enterprises and to develop a methodology for fuzzy cognitive mapping (FCM) to analyze these factors.

Methods. Data analysis and modeling methods, including FCM, were used in this study to formalize the relationships between factors and their influence on the competitiveness of machine-building enterprises. Data related to factors affecting competitiveness, such as technological level, product quality, price level, innovation potential, and managerial experience, were analyzed.

Results. The study resulted in the development of an FCM methodology to analyze the relationships between factors and their influence on the competitiveness of machine-building enterprises. The factors influencing competitiveness, including technological level, product quality, price level, innovation potential, and managerial experience, were evaluated. Key factors with the greatest impact on competitiveness were identified, and the degrees of influence of each factor on competitiveness were established using a scale to formalize the strength of influence.

Conclusion. The results of the study demonstrate that the FCM method is an effective tool for analyzing the competitiveness of machine-building enterprises. It allows for uncertainty and vagueness in the input data and provides a better understanding of the relationships between conceptual variables. The developed FCM methodology can be used to make informed decisions to improve enterprise competitiveness. Overall, the study confirms the importance of analyzing factors influencing competitiveness and demonstrates that FCM can help to represent a complex system and its relationships in a more visual and understandable form. This can be useful for enterprise management in making informed decisions to improve company competitiveness and increase market share.

Keywords: fuzzy cognitive map; FCM method; competitiveness; engineering enterprise; analysis; variable relationships; uncertainty; fuzziness; decision-making.

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

For citation: Buinevich I. A., Kriushina Yu. A., Khalin Yu. A., Katykhin A. I., Kriushin E. A. Method of Construction of a Fuzzy Cognitive Map of the Competitiveness of a Machine-Building Enterprise. *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. 2023; 13(3): 146–163. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-146-163>.

Received 10.07.2023

Accepted 08.08.2023

Published 29.09.2023

Введение

Современный машиностроительный рынок предъявляет высокие требования к конкурентоспособности предприятий, работающих в этой отрасли. Конкуренция в этой сфере постоянно растет, и каждое предприятие стремится улучшить свои показатели для достижения лидерства на рынке [1; 2]. В этой связи разработка эффективных методов оценки и улучшения конкурентоспособности машиностроительных предприятий является актуальной задачей [3; 4; 5; 6; 7].

Представлен метод создания нечеткой когнитивной карты для оценки конкурентоспособности машиностроительного предприятия в качестве сложной социально-экономической системы [2; 8; 9; 10]. Этот метод основан на качественном анализе сложных ситуаций, которые рассматриваются как недостаточно структурированные системы и характеризуются отсутствием точной количественной информации об их состоянии.

Нечеткая когнитивная карта (далее – НКК) представляет собой метод моделирования и анализа сложных систем. Она используется для представления отношений между концептуальными переменными, такими как показатели конкурентоспособности предприятия, и их взаимодействиями [6; 11; 12].

Материалы и методы

Первый шаг в разработке НКК заключается в определении концептуаль-

ных переменных. Концептуальные переменные представляют собой факторы, которые имеют потенциальное влияние на конкурентоспособность машиностроительного предприятия. В рамках этого шага осуществляется идентификация и выбор таких факторов, которые могут оказывать существенное воздействие на успех и конкурентные преимущества предприятия. Примером концептуальных переменных могут быть: качество продукции, технологические параметры производства, цена, уровень обслуживания клиентов и другие параметры, которые считаются значимыми в контексте конкурентоспособности предприятия. В общем случае перечень данных концептуальных переменных определяется группой экспертов, обладающих нужными компетенциями в данной предметной области [13;14].

Второй шаг в разработке НКК включает определение отношений между концептуальными переменными [1; 8; 15; 16]. Эти отношения могут иметь как положительную, так и отрицательную направленность, указывая на существование взаимодействий между концептуальными переменными. Положительные отношения отражают согласованное или совместное воздействие переменных, при котором изменения в одной переменной способствуют положительным изменениям в другой переменной [7; 11; 17; 18]. Отрицательные отношения, напротив, указывают на противоположное воздействие переменных, при кото-

ром изменения в одной переменной вызывают отрицательные изменения в другой переменной. Четкое определение этих отношений в НКК позволяет более точно моделировать и анализировать взаимосвязи между концептуальными переменными и их влияние на конкурентоспособность машиностроительного предприятия [4; 5; 10; 19; 20].

Третий шаг включает определение вида функции принадлежности для каждой концептуальной переменной [13; 16; 21; 22]. Нечеткая функция принадлежности является математической функцией, которая определяет степень принадлежности каждого значения концептуальной переменной к каждому из ее нечетких множеств. Например, для переменной «качество продукции» могут быть определены нечеткие множества, такие как «низкое качество», «среднее качество» и «высокое качество». Каждое значение переменной будет иметь свою принадлежность к каждому из этих нечетких множеств, которая может быть выражена числовым значением от 0 до 1. Таким образом, нечеткая функция принадлежности позволяет учесть нечеткость и размытость данных, а также учесть различные степени влияния каждого значения переменной на конкурентоспособность предприятия [4; 5; 11; 14].

Четвертый шаг в разработке НКК заключается в определении нечетких правил, которые связывают концептуальные переменные и их нечеткие функции принадлежности. Нечеткие правила

описывают логические связи или условия между концептуальными переменными. Например, можно установить следующее нечеткое правило: «если качество продукции является высоким, то цена должна быть высокой». Это правило указывает на зависимость между высоким качеством продукции и высокой ценой. Подобные правила могут быть определены для различных концептуальных переменных и их нечетких функций принадлежности, чтобы описать взаимосвязи и влияние между ними в рамках анализа конкурентоспособности предприятия [5; 15; 19; 20].

Последний шаг в разработке НКК заключается в создании самой карты, которая представляет собой графическое изображение отношений между концептуальными переменными и их взаимодействиями. В НКК каждая переменная представлена своим нечетким множеством, а отношения между переменными выражены в терминах нечетких правил. На карте концептуальные переменные представлены узлами или узловыми элементами, а связи между ними отражаются стрелками или линиями, которые указывают на влияние одной переменной на другую. Визуализация НКК помогает лучше понять структуру и взаимосвязи между концептуальными переменными, что может быть полезным для анализа и принятия решений, направленных на улучшение конкурентоспособности предприятия.

Для применения алгоритма НКК конкурентоспособности машиностроительного предприятия необходимо определить концептуальные переменные, которые могут влиять на конкурентоспособность предприятия, такие как качество продукции, технологические возможности, цены и др. Далее необходимо определить отношения между этими переменными и разработать нечеткие функции принадлежности для каждой переменной.

На основе экспертных оценок было определено влияние параметров друг на друга:

1. Объем реализации предприятия – высокий объем реализации свидетельствует о спросе на продукцию предприятия, что укрепляет его конкурентоспособность. Увеличение объема реализации может требовать расширения производства и увеличения инвестиций.

2. Прибыльность предприятия: высокая прибыльность является показателем эффективности работы предприятия. Она позволяет инвестировать в развитие, снижать стоимость производства и конкурентоспособные цены на продукцию.

3. Объем производства: большой объем производства может привести к снижению себестоимости и увеличению эффективности. Он также может повысить конкурентоспособность предприятия путем обеспечения спроса на рынке и удовлетворения потребностей клиентов.

4. Брак на производстве: высокий уровень брака на производстве может негативно сказаться на качестве продукции и репутации предприятия. Это может привести к потере клиентов и снижению конкурентоспособности.

5. Фонд заработной платы: адекватное и конкурентоспособное вознаграждение сотрудников привлекает высококвалифицированный персонал и способствует повышению производительности труда, что может улучшить конкурентоспособность предприятия.

6. Уровень рентабельности: высокий уровень рентабельности свидетельствует о эффективном использовании ресурсов предприятия и его конкурентоспособности. Рентабельность влияет на финансовую устойчивость и возможность инвестирования в развитие.

7. Платежеспособность: способность предприятия своевременно выполнять финансовые обязательства повышает его доверие и репутацию на рынке. Высокая платежеспособность способствует привлечению инвестиций и укрепляет конкурентоспособность.

8. Ликвидность: высокая ликвидность предприятия позволяет ему быстро реагировать на изменения на рынке, инвестировать в развитие и обеспечивать бесперебойную производственную деятельность, что может повысить его конкурентоспособность.

9. Финансовая устойчивость: предприятие с хорошей финансовой устойчивостью способно выдерживать экономические кризисы, имеет возможность

инвестировать в инновации и развитие, что может повысить его конкурентоспособность.

10. Состояние и износ основных средств производственного предприятия имеют существенное отрицательное влияние на его конкурентоспособность, эффективность производственного процесса качество продукции.

11. Потери из-за неиспользования всех производственных мощностей: неиспользование всех производственных мощностей может привести к увеличению себестоимости продукции и снижению эффективности предприятия. Это может отрицательно сказаться на его конкурентоспособности.

12. Обновление и выход из эксплуатации основных средств: своевременное обновление и выход из эксплуатации устаревших основных средств позволяет предприятию быть в тенденциях рынка, улучшать производительность и конкурентоспособность.

13. Профессиональная структура работников: высокая квалификация и компетентность работников могут повысить качество продукции и эффективность работы предприятия, что положительно сказывается на его конкурентоспособности.

14. Уровень текучести кадров: высокая текучесть кадров может создавать проблемы в производственном процессе, ведя к снижению качества продукции и затратам на обучение новых сотрудников. Высокая текучесть кадров

способствует нестабильности конкурентоспособности предприятия.

15. Бизнес-активность: активное участие в бизнес-среде, поиск новых возможностей и адаптация к изменениям рынка способствуют росту и конкурентоспособности предприятия.

16. Объем инвестиций: высокий объем инвестиций позволяет предприятию внедрять новые технологии, модернизировать производство и повышать его конкурентоспособность.

17. Размер кредитов, особенно если он достигает отрицательных значений или превышает финансовую способность предприятия, может оказать негативное влияние на производственное предприятие.

18. Выручка от продаж: высокая выручка от продаж свидетельствует о спросе на продукцию предприятия и его конкурентоспособности.

19. Спрос на продукцию предприятия: высокий спрос на продукцию свидетельствует о конкурентоспособности предприятия. Обратная связь между спросом и конкурентоспособностью может быть взаимосвязана.

20. Уровень запасов готовой продукции на складе: оптимальный уровень запасов готовой продукции на складе позволяет предприятию оперативно удовлетворять потребности клиентов и поддерживать высокую конкурентоспособность.

21. Потребительские и экономические характеристики продукции: каче-

ство, цена, инновационность и соответствие требованиям потребителей определяют конкурентоспособность продукции и предприятия в целом.

22. Рыночная стоимость акций: высокая рыночная стоимость акций свидетельствует о доверии инвесторов и рынка к предприятию, что укрепляет его конкурентоспособность.

23. Прибыль на акцию: высокая прибыль на акцию является показателем эффективности предприятия и его привлекательности для инвесторов, что способствует конкурентоспособности.

24. Дивиденды на акцию: выплата стабильных и высоких дивидендов на акции привлекает инвесторов и повышает конкурентоспособность предприятия;

25. Уровень инфляции: высокий уровень инфляции может снижать конкурентоспособность предприятия, увеличивая себестоимость производства и цены на продукцию.

26. Нормативные ставки обязательных налогов и сборов: высокие нормативные ставки налогов и сборов могут оказывать негативное влияние на финансовое положение предприятия и его конкурентоспособность.

27. Эффективность маркетинговых мероприятий: эффективные маркетинговые мероприятия способствуют привлечению клиентов, увеличению объема продаж и повышению конкурентоспособности.

28. Уровень лояльности потребителей: высокий уровень лояльности потребителей обеспечивает повторные покупки, рекомендации и поддержку предприятия, что способствует его конкурентоспособности

29. Репутация предприятия: хорошая репутация предприятия на рынке создает доверие клиентов, инвесторов и партнеров, что укрепляет его конкурентоспособность.

30. Распределение продукции: эффективное распределение продукции позволяет предприятию доставлять свою продукцию клиентам вовремя и с минимальными затратами, что способствует его конкурентоспособности.

31. Качество продукции: высокое качество продукции является ключевым фактором конкурентоспособности предприятия. Оно обеспечивает удовлетворение потребностей клиентов, повышает их лояльность и способствует репутации предприятия.

32. Конкурентоспособность предприятия: конкурентоспособность предприятия зависит от множества факторов, взаимосвязь которых образует сложную картины. Взаимодействие этих факторов определяет успех и результативность предприятия на рынке.

Наконец, на основе концептуальных переменных, нечетких функций принадлежности и нечетких правил была построена нечеткая когнитивная карта конкурентоспособности машиностроительного предприятия (рис. 1).

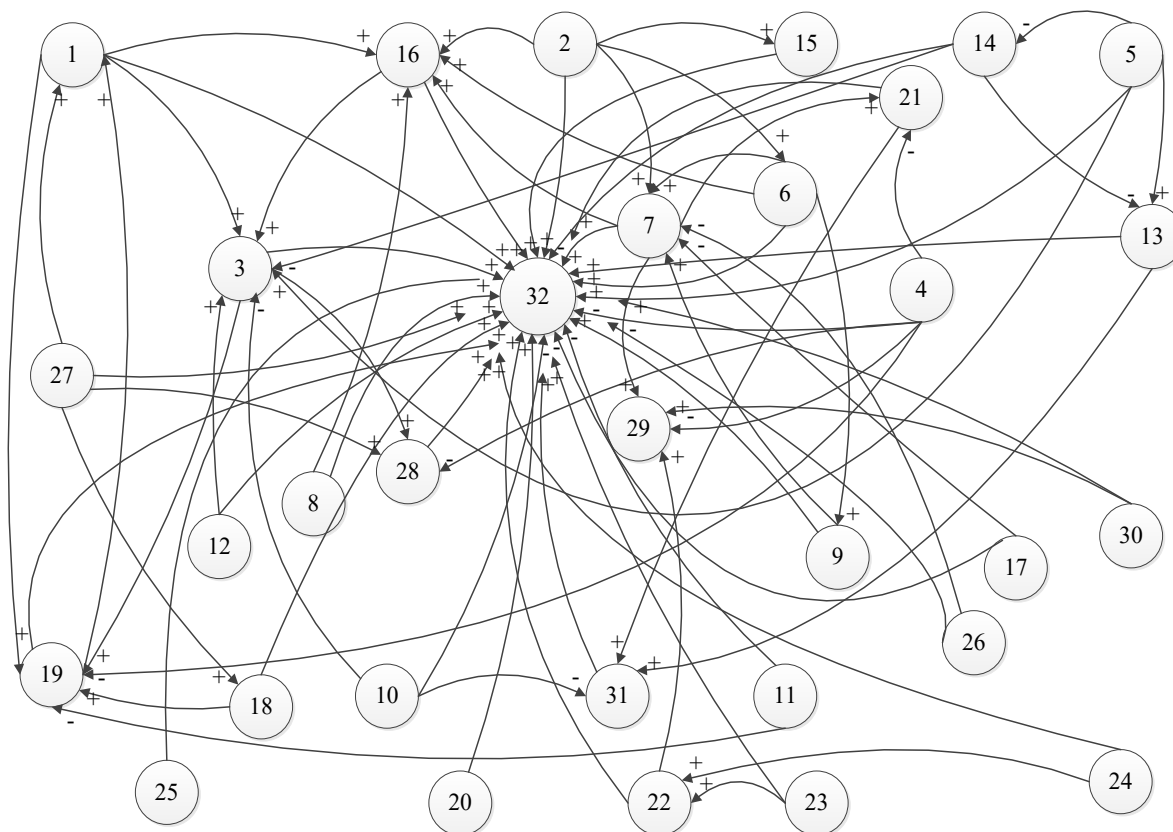


Рис. 1. Нечеткая когнитивная карта отношений между концептуальными переменными

Fig. 1. Fuzzy cognitive map of relationships between conceptual variables

Формализация метода приводит к представлению системы конкурентоспособности машиностроительного предприятия в виде когнитивной матрицы, которая имеет следующий вид:

$$X = \langle E, A \rangle, \quad (1)$$

где $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ представляет собой множество факторов или концептов.

Введем бинарное отношение A – бинарное отношение на множестве E , которое определяет связи между его элементами. Если изменение концепта e_i (причины) влияет на изменение значения концепта e_j (следствия), то элементы e_i и e_j считаются связанным отношением (обозначается $e_i A e_j$). В данном случае ис-

пользуется терминология когнитивного моделирования, где e_i влияет на концепт e_j . Отношение A может быть представлено как объединение двух непересекающихся подмножеств:

$$A = A^+ \cup A^-, \quad (2)$$

где A^+ представляет собой множество положительных связей, а A^- – множество отрицательных связей.

На следующем этапе было введено понятие интенсивности влияния, которое может быть определено при использовании нечетких когнитивных карт. Элементы a_{ij} таких карт характеризуют направление и степень интенсивности (вес) влияния между концептами e_i и e_j :

$$a_{ij} = a(e_i, e_j), \quad (3)$$

где a – нормативный показатель интенсивности влияния, обладающий следующими характеристиками:

- 1) $-1 \leq a_{ij} \leq +1$;
- 2) $a_{ij} = 0$, если e_i не зависит от e_j (влияние отсутствует);
- 3) $a_{ij} = 1$, при самом большом положительном влиянии e_i на e_j т. е. когда любое изменение, связанное с концептом e_j ,

однозначно определено действиями, связанным с концептом e_i ;

- 4) $a_{ij} = -1$ при самом большом отрицательном влиянии, т. е. когда любая реализация изменений, связанных с концептом e_j , однозначно подавляется действиями, связанными с концептом e_i .

В таблице 1 приведены значения интенсивностей влияния факторов конкурентоспособности машиностроительного предприятия.

Таблица 1. Перечень факторов, влияющих на конкурентоспособность машиностроительного предприятия

Table 1. List of factors affecting the competitiveness of a machine-building enterprise

Факторы	Характер и интенсивность влияния на целевые концепты – следствия
1. Объем реализации предприятия	+0,9
2. Прибыльность предприятия	+0,8
3. Объем производства	+0,5
4. Брак на производстве	-0,6
5. Фонд заработной платы	+0,3
6. Уровень рентабельности	+0,9
7. Платежеспособность	+0,9
8. Ликвидность	+0,7
9. Финансовая устойчивость	+0,8
10. Состояние и износ основных средств	-0,4
11. Потери из-за неиспользования всех производственных мощностей	-0,3
12. Обновление и выход из эксплуатации основных средств	+0,3
13. Профессиональная структура работников	+0,7
14. Уровень текучести кадров	-0,4
15. Бизнес-активность	+0,8
16. Объем инвестиций	+0,8
17. Размер кредитов	-0,6
18. Выручка от продаж	+0,4
19. Спрос на продукцию предприятия	+0,7
20. Уровень запасов готовой продукции на складе	+0,7
21. Потребительские и экономические характеристики продукции	+1

Окончание табл. 1 / Table 1 (ending)

Факторы	Характер и интенсивность влияния на целевые кон-цепты – следствия
22. Рыночная стоимость акций	+0,7
23. Прибыль на акцию	+0,3
24. Дивиденды на акцию	+0,5
25. Уровень инфляции	+0,8
26. Нормативные ставки обязательных налогов и сборов	–0,6
27. Эффективность маркетинговых мероприятий	+0,8
28. Уровень лояльности потребителей	+1
29. Репутация предприятия	+0,7
30. Распределение продукции	+0,6
31. Качество продукции	+0,8
32. Конкурентоспособность предприятия	+0,7

При определении силы влияния факторов на конкурентоспособности была использована шкала соответствия

(табл. 2), переводящая экспертные оценки в количественные значения от 0 до 1.

Таблица 2. Шкала для формализации силы влияния факторов на конкурентоспособность машиностроительного предприятия

Table 2. Scale for formalizing the strength of the influence of factors on the competitiveness of a machine-building enterprise

Элемент шкалы	Интерпретация в терминах силы влияния
0–0,1	Отсутствие влияния
0,1–0,3	Минимальное влияние
0,3–0,5	Незначительное влияние
0,5–0,7	Умеренное влияние
0,7–0,9	Значительное влияние
0,9–1	Сильное влияние
1	Максимальное влияние

На основе полученных оценка была построена общая когнитивная карта, показывающая направление и силу влияния

выделенных факторов на интегральный показатель конкурентоспособности машиностроительного предприятия (рис. 2).

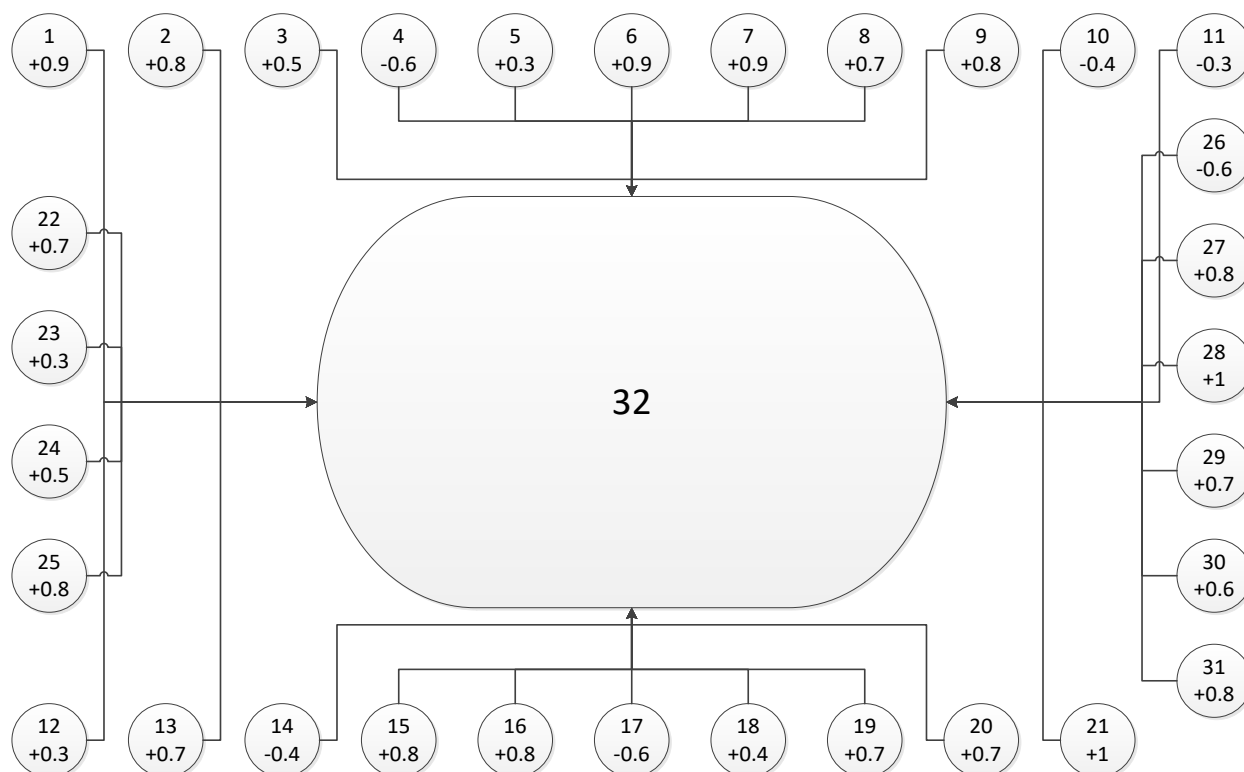


Рис. 2. Общая когнитивная карта, в которой отражен характер связей и влияний факторов на конкурентоспособность машиностроительных предприятий

Fig. 2. General cognitive map, which reflects the nature of the relationships and influences of factors on the competitiveness of machine-building enterprises

Результаты и их обсуждение

В ходе исследования были определены ключевые этапы разработки НКК для анализа конкурентоспособности машиностроительного предприятия. Эти этапы включают определение концептуальных переменных, определение отношений между переменными, определение нечеткой функции принадлежности и разработку нечетких правил. Затем создается сама НКК, которая представляет собой графическое изображение взаимосвязей между концептуальными переменными.

Определение концептуальных переменных является первым и важным шагом в разработке НКК. В данном случае

для анализа конкурентоспособности машиностроительного предприятия были выбраны факторы, такие как качество продукции, технологические возможности, цены и другие, которые имеют потенциальное влияние на успех и конкурентные преимущества предприятия. Это позволяет учесть различные аспекты, которые считаются значимыми в контексте конкурентоспособности.

Определение отношений между концептуальными переменными является вторым шагом и позволяет выявить связи и взаимодействия между переменными. Эти отношения могут быть положительными или отрицательными, что указывает на согласованное или противоположное воздействие переменных

друг на друга. Четкое определение этих отношений позволяет более точно моделировать и анализировать влияние переменных на конкурентоспособность предприятия.

Определение нечеткой функции принадлежности для каждой концептуальной переменной является третьим шагом. Нечеткая функция принадлежности позволяет учесть нечеткость и размытость данных, а также учесть различные степени влияния каждого значения переменной на конкурентоспособность предприятия. Она выражается числовым значением от 0 до 1, указывая на степень принадлежности каждого значения к нечетким множествам, определенным для каждой переменной.

Определение нечетких правил является четвертым шагом и позволяет описать логические связи или условия между концептуальными переменными. Эти правила описывают зависимости между переменными и помогают понять, как изменения в одной переменной могут повлиять на другую переменную. Они формулируются на основе экспертного знания и опыта в предметной области.

Последним шагом является создание самой НКК, которая визуализирует структуру и взаимосвязи между концептуальными переменными. На НКК каждая переменная представлена своим нечетким множеством, а отношения между переменными выражены в терминах нечетких правил. Это графическое изображение позволяет лучше понять влияние

каждой переменной на конкурентоспособность предприятия и может быть полезным для анализа и принятия решений, направленных на улучшение конкурентоспособности.

Выводы

Метод построения НКК представляет собой мощный инструмент для анализа и оценки конкурентоспособности машиностроительного предприятия. В контексте конкурентной среды и постоянно меняющихся условий рынка понимание факторов, влияющих на конкурентоспособность, становится критически важным для успешного функционирования предприятия.

Одной из основных преимуществ НКК является его способность учитывать неопределенность и нечеткость входных данных. В контексте конкурентоспособности множество факторов может быть сложно оценить или измерить точно. НКК позволяет работать с нечеткими понятиями и неопределенными связями между переменными, что увеличивает точность и реалистичность результатов анализа.

Кроме того, НКК позволяет лучше понять взаимосвязи между концептуальными переменными, т. е. выявить зависимости и влияния одних факторов на другие. Это позволяет идентифицировать ключевые факторы, которые могут оказывать наибольшее влияние на конкурентоспособность предприятия, и определить приоритетные направления для улучшения.

Применение НКК в анализе конкурентоспособности машиностроительного предприятия может помочь в принятии обоснованных решений по улучшению его позиций на рынке. Результаты анализа могут служить основой для разработки стратегий развития, оптимизации процессов производства, управления финансами, маркетинговых действий и других аспектов, влияющих на конкурентоспособность.

В целом использование НКК в анализе конкурентоспособности предприятия позволяет более полно и системно рассмотреть влияние различных факторов и их взаимосвязи. Это помогает предприятию лучше понять свои сильные и слабые стороны, выявить потенциал для улучшения и принять обоснованные решения, направленные на повышение конкурентоспособности и достижение успеха на рынке.

Список литературы

1. Zhang X. Research on core competitiveness evaluation of small and medium sized enterprises with hesitant triangular fuzzy multiple attribute decision making // *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. 2023. Vol. 45, N 2. P. 1–11. <https://doi.org/10.3233/JIFS-232839>.
2. Balan V. Fuzzy evaluation of the competitiveness of business models of enterprises // *Economic development strategies: micro, macro and mesoeconomic levels*. 2021. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-191-6-22>.
3. Ивахник Д. Е. Конкурентоспособность бизнес-процессов предприятия: понятие и метод оценки // *Актуальные проблемы экономики и менеджмента*. 2022. № 1(33). С. 5–15.
4. Михайлов М. Н. Оценка конкурентоспособности предприятий машиностроительного комплекса // *Российское предпринимательство*. 2012. № 1(99). С. 120–127.
5. Третьяков В. Д., Калина А. В., Ерыпалов С. Е. Оценка конкурентоспособности крупных машиностроительных комплексов // *Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление*. 2016. Т. 15, № 2. С. 198–219. <https://doi.org/10.15826/vestnik.2016.15.2.011>.
6. Панюкова Е. А. Реализация стратегии развития в рамках повышения конкурентоспособности промышленного предприятия // *Молодежь и наука: шаг к успеху: сборник научных статей IV Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых*. Курск: Университетская книга, 2020. Т. 1. С. 155–158.
7. Чернышова Г. Ю. Методика оценки конкурентоспособности промышленного предприятия с использованием моделей искусственного интеллекта // *Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета*. 2009. № 4(28). С. 200–202.
8. Vitiuk A. The study of the competitiveness of leading engineering enterprises // *Innovation and Sustainability*. 2022. P. 124–131. <https://doi.org/10.31649/ins.2022.3.124.131>.

9. Rotshtein A. Fuzzy cognitive maps in the dependability analysis of systems // *Dependability*. 2019. Vol. 19, N 4. P. 24–31. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-4-24-31>.
10. Палюх Б. В., Какатунова Т. В. Нечеткая когнитивная карта как инструмент моделирования инновационной деятельности на региональном уровне // *Программные продукты и системы*. 2012. № 4. С. 26–31.
11. Мингалева Ж. А., Старков Ю. В., Тарасов А. В. Повышение конкурентоспособности предприятий на основе выбора стратегических альтернатив развития // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Экономика. Управление. Право*. 2019. Т. 19, № 2. С. 155–164. <https://doi.org/10.18500/1994-2540-2019-19-2-155-164>.
12. Халин Ю. А., Сизов А. С., Игнатенко А. Н. Нечётко-множественная модель многокритериальной оценки конкурентоспособности предприятия // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2011. № 5-1 (38). С. 53–57.
13. Захарова А. А., Подвесовский А. Г., Исаев Р. А. Нечеткие когнитивные модели в управлении слабоструктурированными социально-экономическими системами // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2020. № 4(20). С. 5–23. <https://doi.org/10.38028/ESI.2020.20.4.001>.
14. Круглов И. В. Особенности методики оценки конкурентоспособности продукции машиностроительных предприятий // *Инновационная наука*. 2016. № 2-2. С. 11–14.
15. Яксанова Н. Н., Яксанов Д. С. Разработка методики оценки уровня конкурентоспособности промышленного предприятия в современных условиях // *Экономический журнал*. 2018. № 3(51). С. 33–49.
16. Мишустина Т. С. Когнитивные технологии в процессе разработки системы управления конкурентоспособностью предприятия и его торговой марки // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2013. № 2. С. 104–110.
17. Тополева Т. Н. Управление модернизацией предприятий машиностроения в рамках интегрированных корпоративных структур // *Управленческие науки*. 2018. Т. 8, № 3. С. 108–119. <https://doi.org/10.26794/2404-022X-2018-8-3-108-119>.
18. Кузьбожев Э. Н., Можейко А. Г., Халин Ю. А. Управление инновационными процессами на основе интеллектуальных информационных технологий // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2011. № 6-2 (39). С. 83–86.
19. Лисицин Л. А., Халин Ю. А., Лисицин А. Л. Системы поддержки принятия управленческих решений в условиях неполной информации // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2012. № 4-2 (43). С. 95–99.
20. Сизов А. С., Халин Ю. А., Цепов А. Ю. Обработка данных на основе owa-оператора и ДСМ-метода для оценки риска инвестирования малого инновационного предприятия // *Телекоммуникации*. 2014. № 12. С. 42–45.

21. Васяйчева В. А. Проблемы и перспективы развития транспортного машиностроения в условиях «новой» экономики // Цифровая экономика: проблемы и перспективы развития: сборник научных статей Межрегиональной научно-практической конференции. Курск: Университетская книга, 2019. Т. 2. С. 93–101.

22. Халин Ю. А. Подход к прогнозированию состояний конкурирующих предприятий на основе ДСМ – метода автоматического порождения гипотез // Естественные и технические науки. 2011. № 6 (56). С. 521–22.

References

1. Zhang X. Research on core competitiveness evaluation of small and medium sized enterprises with hesitant triangular fuzzy multiple attribute decision making. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2023, vol. 45, no. 2, pp. 1–11. <https://doi.org/10.3233/JIFS-232839>

2. Balan V. Fuzzy evaluation of the competitiveness of business models of enterprises. *Economic Development Strategies: Micro, Macro and Meso-economic Levels*, 2021. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-191-6-22>

3. Ivakhnik D. E. Konkurentosposobnost' biznes-protsessov predpriyatiya: ponyatiye i metod otsenki [Competitiveness of business processes of an enterprise: concept and method of assessment]. *Aktual'nyye problemy ekonomiki i menedzhmenta = Current Problems of Economics and Management*, 2022, no. 1(33), pp. 5–15.

4. Mikhailov M. N. Otsenka konkurentosposobnosti predpriyatiy mashinostroitel'nogo kompleksa [Assessing the competitiveness of enterprises of the machine-building complex]. *Rossiyskoye predprinimatel'stvo = Russian Entrepreneurship*, 2012, no. 1(99), pp. 120–127.

5. Tretyakov V. D., Kalina A. V., Erypalov S. E. Otsenka konkurentosposobnosti krupnykh mashinostroitel'nykh kompleksov [Assessing the competitiveness of large machine-building complexes]. *Vestnik UrFU. Seriya: Ekonomika i upravleniye = Bulletin of UrFU. Series: Economics and Management*, 2016, vol. 15, no. 2, pp. 198–219. <https://doi.org/10.15826/vestnik.2016.15.2.011>

6. Panyukova E. A. [Implementation of development strategy within the framework of increasing the competitiveness of an industrial enterprise]. *Molodezh' i nauka: shag k uspehu. Sbornik nauchnykh statej IV Vserossijskoj nauchnoj konferencii perspektivnykh razrabotok molodyh uchenykh* [Youth and science: a step towards success. Collection of scientific articles of the IV All-Russian Scientific Conference of promising developments of young scientists]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2020, pp. 155–158. (In Russ.)

7. Chernyshova G. Yu. Metodika otsenki konkurentosposobnosti promyshlennogo predpriyatiya s ispol'zovaniyem modeley iskusstvennogo intellekta [Methodology for assessing the competitiveness of an industrial enterprise using artificial intelligence models].

Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo sotsial'no-ekonomicheskogo universiteta = Bulletin of the Saratov State Socio-Economic University, 2009, no. 4(28), pp. 200–202.

8. Vitiuk A. The study of the competitiveness of leading engineering enterprises. *Innovation and Sustainability*, 2022, pp. 124–131. <https://doi.org/10.31649/ins.2022.3.124.131>

9. Rotshtein A. Fuzzy cognitive maps in the dependability analysis of systems. *Dependability*, 2019, vol. 19 (4), pp. 24–31. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-4-24-31>

10. Palyukh B.V., Kakatunova T.V. Nechetkaya kognitivnaya karta kak instrument modelirovaniya innovatsionnoy deyatel'nosti na regional'nom urovne [Fuzzy cognitive map as a tool for modeling innovative activity at the regional level]. *Programmnyye produkty i sistemy = Software Products and Systems*, 2012, no. 4, pp. 26–31.

11. Mingaleva Zh. A., Starkov Yu. V., Tarasov A. V. Povysheniye konkurentosposobnosti predpriyatiy na osnove vybora strategicheskikh al'ternativ razvitiya [Increasing the competitiveness of enterprises based on the choice of strategic development alternatives]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Ekonomika. Upravleniye. Pravo = Proceedings of Saratov University. New Episode. Series: Economics. Control. Right*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 155–164. <https://doi.org/10.18500/1994-2540-2019-19-2-155-164>

12. Khalin Yu. A., Sizov A. S., Ignatenko A. N. Nechetko-mnozhestvennaya model' mnogokriterial'noy otsenki konkurentosposobnosti predpriyatiya [Fuzzy-set model for multi-criteria assessment of the competitiveness of an enterprise]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 5-1 (38), pp. 53–57.

13. Zakharova A. A., Podvesovsky A. G., Isaev R. A. Nechetkiye kognitivnyye modeli v upravlenii slabostruktirovannymi sotsial'no-ekonomicheskimi sistemami [Fuzzy cognitive models in the management of weakly structured socio-economic systems]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and Mathematical Technologies in Science and Management*, 2020, no. 4(20), pp. 5–23. <https://doi.org/10.38028/ESI.2020.20.4.001>

14. Kruglov I. V. Osobennosti metodiki otsenki konkurentosposobnosti produktsii mashinostroitel'nykh predpriyatiy [Features of the methodology for assessing the competitiveness of products of machine-building enterprises]. *Innovatsionnaya nauka = Innovative Science*, 2016, no. 2-2, pp. 11–14.

15. Yaksanova N. N., Yaksanov D. S. Razrabotka metodiki otsenki urovnya konkurentosposobnosti promyshlennogo predpriyatiya v sovremennykh usloviyakh [Development of a methodology for assessing the level of competitiveness of an industrial enterprise in modern conditions]. *Ekonomicheskii zhurnal = Economic Journal*, 2018, no. 3(51), pp. 33–49.

16. Mishustina T. S. Kognitivnyye tekhnologii v protsesse razrabotki sistemy upravleniya konkurentosposobnost'yu predpriyatiya i yego trgovoy marki [Cognitive technologies in the

process of developing a system for managing the competitiveness of an enterprise and its trademark]. *Aktual'nyye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk = Current Problems of the Humanities and Natural Sciences*, 2013, no. 2, pp. 104–110.

17. Topoleva T. N. Upravleniye modernizatsiyey predpriyatiy mashinostroyeniya v ramkakh integrirovannykh korporativnykh struktur [Management of modernization of mechanical engineering enterprises within the framework of integrated corporate structures]. *Upravlencheskiye nauki = Management Sciences*, 2018, vol. 8, no. 3, pp. 108–119. <https://doi.org/10.26794/2404-022X-2018-8-3-108-119>

18. Kuzbozhev E. N., Mozheiko A. G., Khalin Yu. A. Upravleniye innovatsionnymi protsessami na osnove intellektual'nykh informatsionnykh tekhnologiy [Management of innovative processes based on intelligent information technologies]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 6-2 (39), pp. 83–86.

19. Lisitsin L. A., Khalin Yu. A., Lisitsin A. L. Sistemy podderzhki prinyatiya upravlencheskikh resheniy v usloviyakh nepolnoy informatsii [Systems for supporting management decision-making in conditions of incomplete information]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4-2 (43), pp. 95–99.

20. Sizov A. S., Khalin Yu. A., Tsepov A. Yu. Obrabotka dannykh na osnove owa-operatora i DSM-metoda dlya otsenki riska investirovaniya malogo innovatsionnogo predpriyatiya [Data processing based on the owa operator and the DSM method for assessing the investment risk of a small innovative enterprise]. *Telekommunikatsii = Telecommunications*, 2014, no. 12, pp. 42–45.

21. Vasyaycheva V. A. [Problems and prospects for the development of transport engineering in the conditions of the "new" economy]. *Cifrovaya ekonomika: problemy i perspektivy razvitiya. Sbornik nauchnykh statej Mezhhregional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Digital economy: problems and prospects of development. Collection of scientific articles of the Interregional scientific and practical conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2019, pp. 93–101. (In Russ.)

22. Khalin Yu. A. Podkhod k prognozirovaniyu sostoyaniy konkuriruyushchikh predpriyatiy na osnove DSM – metoda avtomaticheskogo porozhdeniya gipotez [An approach to forecasting the states of competing enterprises based on DSM – the method of automatic generation of hypotheses]. *Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki = Natural and Technical Sciences*, 2011, no. 6 (56), pp. 521–522.

Информация об авторах / Information about the Authors

Буйневич Ирина Александровна, аспирант,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: ira.buynovich@yandex.ru,
ORCID: 0009-0009-4634-0581

Irina A. Buinevich, Post-Graduate Student,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: ira.buynovich@yandex.ru,
ORCID: 0009-0009-4634-0581

Кriuшина Юлия Алексеевна, аспирант,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: july.tchict@yandex.ru,
ORCID: 0009-0000-1898-8668

Yulia A. Kriushina, Post-Graduate Student,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: july.tchict@yandex.ru,
ORCID: 0009-0000-1898-8668

Халин Юрий Алексеевич, кандидат
технических наук, доцент, доцент кафедры
программной инженерии, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: yur-khalin@yandex.ru,
ORCID: 0000-0002-7020-8515

Yuri A. Khalin, Cand. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Associate Professor
of the Department of Software Engineering,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: yur-khalin@yandex.ru,
ORCID: 0000-0002-7020-8515

Катыхин Александр Иванович, кандидат
технических наук, доцент, доцент кафедры
программной инженерии, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: katykhin.a@yandex.ru,
ORCID: 0009-0008-6487-8126

Alexander I. Katykhin, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor, Associate
Professor of the Department of Software
Engineering, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: katykhin.a@yandex.ru,
ORCID: 0009-0008-6487-8126

Кriuшин Евгений Александрович,
аспирант, Юго-Западный государственный
университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: july.tchict@yandex.ru,
ORCID: 0009-0006-9772-5367

Evgeniy A. Kriushin, Post-Graduate Student,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: july.tchict@yandex.ru,
ORCID: 0009-0006-9772-5367

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/>.