МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

Юго-Западного государственного университета

Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение

Научный журнал

Том 10 № 3/4 / 2020

Proceedings

of the Southwest State University

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

Scientific Journal

Vol. 10 № 3/4 / 2020

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

Научный рецензируемый журнал

Основан в 2011 г.

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

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

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

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

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

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

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

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

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

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

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р. М. Алгулиев, д-р техн. наук, профессор;
Ю. С. Бехтин, д-р техн. наук, профессор;
А. А. Бурмака, д-р техн. наук, профессор;
В. Н. Гридин, д-р техн. наук, профессор;
А. Л. Жизняков, д-р техн. наук, профессор;
Ж. Т. Жусубалиев, д-р техн. наук, профессор;
С. А. Зинкин, д-р техн. наук, доцент;
Зо Зо Тун, канд. техн. наук, профессор;
И. В. Зотов, д-р техн. наук, профессор;
Н. А. Кореневский, д-р техн. наук, профессор;
Е. Н. Коровин, д-р техн. наук, профессор;
А. Н. Пылькин, д-р техн. наук, профессор;
Риад Таха Аль-Касасбех, д-р техн. наук, профессор;
В. Г. Рубанов, д-р техн. наук, профессор;
С. П. Серегин, д-р мед. наук, профессор;
А. С. Сизов, д-р техн. наук, профессор;
В. С. Титов, д-р техн.наук, профессор,
заслуженный деятель науки России;
С. А. Филист, д-р техн. наук, профессор;
А. В. Филонович, д-р техн. наук, профессор;
А. А. Ханова, д-р техн. наук, доцент

Учредитель и издатель:
ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
Адрес учредителя, издателя и редакции:
305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94
Телефон: +7(4712) 22-25-26,
Факс: +7(4712) 50-48-00.
E-mail: rio_kursk@mail.ru

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:
Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
(ПИ №ФС77-44620 от 15.04.2011).

ISSN 2223-1536 (Print)

Сайт журнала: https://swsu.ru/izvestiya/seriestechniq/

© Юго-Западный государственный университет, 2020

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 44291
в объединенном каталоге
«Пресса России».

Периодичность: четыре раза в год

Свободная цена.

Оригинал-макет подготовлен О. В. Кофановой

Подписано в печать 30.11.2020. Формат 60x84/8.
Бумага офсетная. Усл.печ.л. 19,9.
Тираж 1000 экз. Заказ 31.

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

Peer-reviewed scientific journal
Published since 2011

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

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

All papers are published free of charge.

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITOR-IN-CHIEF

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

R. M. Alguliyev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
Y. S. Bekhtin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
A. A. Burmaka, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);
V. N. Gridin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
A. L. Zhiznyakov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
Zh. T. Zhusubaliyev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
S. A. Zinkin, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor;
Zo Zo Thun, Candidate of Engineering, Professor;
I. V. Zotov, Dr. of Sci. (Engineering);
N. A. Korenevsky, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
E. N. Korovin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
A. N. Pylkin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
Riad Taha Al-Kasasbeh, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
V. G. Rubanov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
S. P. Seryogin, Doctor of Sci. (Medical), Professor;
A. S. Sizov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
V. S. Titov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
S. A. Filist, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
A. V. Filonovich, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
A. A. Khanova, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor

Founder and Publisher :
"Southwest State University"
Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation
Phone: (+74712) 22-25-26,
Fax: (+74712) 50-48-00.
E-mail: rio_kursk@mail.ru

The Journal is officially registered by:
The Federal Supervising Authority in the Field of Communication, Information Technology and Mass media
(PI №FS77-44620 of 15.04.2011).

ISSN 2223-1536 (Print)

Web-site: https://swsu.ru/izvestiya/seriestechniq/

© Southwest State University, 2020

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

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

Subscription and distribution:
the journal is distributed by subscription.
Subscription index 44291
in the General Catalogue "Pressa Rossii"

Frequency: Quarterly

Free price

Original lay-out design: O. V. Kofanova

Signed for printing 30.11.2020. Format 60x84/8.
Offset paper. Printer's sheets: 19,9.
Circulation 1000 copies. Order 31.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ 8

Оригинальные статьи

Формирование дескрипторов для классификаторов функционального состояния системы дыхания на основе спектрального анализа электрокардиосигнала 8

Мяснянкин М. Б., Филист С. А., Киселев А. В., Кузьмин А. А.

Классификации биологических объектов на основе многомерного биоимпедансного анализа 29

Мирошников А. В., Шаталова О. В., Стадниченко Н. С., Шульга Л. В.

МЕХАТРОНИКА, РОБОТОТЕХНИКА 50

Оригинальные статьи

Моделирование системы управления режимами токарной обработки с учетом изменения температуры в зоне резания 50

Рубанов В. Г., Рыбин И. А., Сильченко С. А., Рыбина А. В.

РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ 64

Оригинальные статьи

Тенденции применения оптоакустического метода для визуализации биологических тканей 64

Кравчук Д. А.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ 75

Оригинальные статьи

Статистический анализ успеваемости студентов в рамках теории латентных переменных 75

Маслак А. А.

Автоматизация учебного процесса вуза для аккредитации 90

Лисицин А. Л., Лисицин А. Л., Лисицин Л. А.

Прогнозирование возникновения, развития и донозологическая диагностика кожных болезней по энергетическому разбалансу меридианных структур организма 102

Лукашов А. Л., Письменная Е. В., Родионова С. Н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ 118

Оригинальные статьи

Нечеткие модели дифференциальной диагностики очаговых образований поджелудочной железы по данным эндоскопической ультрасонографии на основе анализа реперных схем эталонных эндосонограмм 118

Белозеров В. А., Кореневский Н. А.

Моделирование спектров высших гармоник в системах электроснабжения 136

Бирюлин В. И., Грачева Е. И., Куделина Д. В., Танцюра А. О.

Моделирование работы асинхронных электродвигателей при изменениях напряжения электрической сети 151

Бирюлин В. И., Грачева Е. И., Куделина Д. В., Ларин О. М.

К сведению авторов 170

CONTENT

INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS 8

Original articles

Formation of Descriptors for Classifiers of the Functional State of the Respiratory System Based on Spectral Analysis of the Electrocardio Signal 8
Myasnyankin M. B., Philist S. A., Kiselev A. V., Kuzmin A. A.

Classifications of Biological Objects Based on Multi-Dimensional Bioimpedance Analysis 29
Miroshnikov A. V., Shatalova O. V., Stadnichenko N. S., Shulga L. V.

MECHATRONICS, ROBOTICS 50

Original articles

Modeling of the Control System for Turning Modes with Regard to Temperature Changes in the Cutting Zone 50
Rubanov V. G., Rybin I. A., Silchenko S. A., Rybina A. V.

IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING 64

Original articles

Trends in the Application of the Optoacoustic Method for Visualization of Biological Tissues 64
Kravchuk D. A.

SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING 75

Original articles

Statistical analysis of Students' Performance in the Framework of the Theory of Latent Variables 75
Maslak A. A.

Automation of the Educational Process of the University for Accreditation 90
Lisitsin A. L., Lisitsin A. L., Lisitsin L. A.

Method for Predicting and Diagnostics of Professional Diseases by Energetic Balance of Meridian Structures in the Organism 102
Lukashov M. I., Pismennaya E. V., Rodionova S. N.

MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS 118

Original articles

Differential Diagnostics of Focal Formations of the Pancreas Using Fuzzy Models According to Endoscopic Ultrasonography Data Based on Analysis of Repeated Schemes of Ethalonomography 118
Belozerov V. A., Korenevsky N. A.

High Harmonics Spectra Modeling in Power Supply Systems 136
Biryulin V. I., Gracheva E. I., Kudelina D. V., Tantsyura A. O.

Asynchronous Electric Motors Operation Modeling with the Electrical Network Voltage Changes 151
Biryulin V. I., Gracheva E. I., Kudelina D. V., Larin O. M.

Information for Authors 170

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.89

Формирование дескрипторов для классификаторов функционального состояния системы дыхания на основе спектрального анализа электрокардиосигнала

М. Б. Мяснянкин[1], С. А. Филист[1], А. В. Киселев[1], А. А. Кузьмин ✉ [1]

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

✉ e-mail: ku3bmin@gmail.com

Резюме

Цель исследования *– разработка метода формирования дескрипторов для нейросетевых классификаторов функционального состояния системы дыхания, основанного на анализе медленных волн частотно-временного спектра электрокардиосигнала.*

Методы*. Сущность предлагаемого метода состоит в исследовании взаимодействия ритмов сердечно-сосудистой, системы дыхания и ритмов более высокого порядка, которое осуществляется на вейвлет-плоскости электрокардиосигнала. На ней выделяются строки, частотный диапазон которых соответствует ритму дыхания. Было показано, что эти строки модулируются VLF-волнами, которые определяют вариабельность дыхательного ритма. Осуществляя Фурье-анализ этих строк, вейвлет-плоскости формируют дескрипторы для обучаемого классификатора функционального состояния системы дыхания.*

Результаты. *Проведенные исследования показали, что для формирования дескрипторов для классификаторов функционального состояния системы дыхания целесообразно использовать мониторинговые сигналы пневмограммы и газообмена легких, которые отражают системные ритмы, ответственные за вариации ритма дыхания. Так как в условиях реанимации такие сигналы получить весьма сложно, то в качестве их альтернативы был предложен анализ мониторингового электрокардиосигнала. Разработан метод формирования дескрипторов для построения классификаторов функционального состояния системы дыхания, основанный на анализе этого сигнала. В результате осуществления метода сигналы медленных волн, отражающие вариации ритма дыхания, извлекаются из мониторингового электрокардиосигнала посредством разведочного анализа в области частот ритма дыхания и последующего вейвлет-анализа в области частот, соответствующих определенному в результате разведочного анализа частотному диапазону ритма дыхания. Компоненты релевантных строк вейвлет-плоскости используются для вычисления дескрипторов обучаемой нейронной сети, принимающей решение по отнесению текущего состояния системы дыхания к тестируемому состоянию.*

Заключение. *Показано, что релевантные строки вейвлет-плоскостей коррелированы с системой дыхания и посредством их Фурье-анализа могут быть выделены дескрипторы, предназначенные для обучения нейросетевых классификаторов функционального состояния системы дыхания.*

© Мяснянкин М. Б., Филист С. А., Киселев А. В., Кузьмин А. А., 2020

Ключевые слова: *кардиоритм; система дыхания; системные ритмы; преобразование Фурье; вейвлет-преобразование; ритм дыхания; обучаемый классификатор; дескриптор.*

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

Финансирование: *Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90058.*

Для цитирования: Формирование дескрипторов для классификаторов функционального состояНия системы дыхания на основе спектрального анализа электрокардиосигнала / М. Б. Мяснянкин, С. А. Филист, А. В. Киселев, А. А. Кузьмин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 8–28.

Поступила в редакцию 01.07.2020 *Подписана в печать 06.08.2020* *Опубликована 30.11.2020*

Formation of Descriptors for Classifiers of the Functional State of the Respiratory System Based on Spectral Analysis of the Electrocardio Signal

Maxim B. Myasnyankin[1], Sergei A. Philist[1], Alexey V. Kiselev[1], Alexander A. Kuzmin ✉ [1]

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

✉ e-mail: ku3bmin@gmail.com

Abstract

Purpose of research*. Development of a method for forming descriptors for neural network classifiers of the functional state of the respiratory system, based on the analysis of slow waves of the time-frequency spectrum of the electrocardiosignal.*

Methods. *The essence of the proposed method is to study the interaction of the rhythms of the cardiovascular, respiratory system and rhythms of a higher order, which is carried out on the wavelet plane of the electrocardiosignal. Lines are highlighted on it, the frequency range of which corresponds to the rhythm of breathing. These lines have been shown to be modulated by VLF waves, which determine respiratory rate variability. Carrying out Fourier analysis of these lines of the wavelet plane, descriptors are formed for the trained classifier of the functional state of the respiratory system.*

Results. *The studies have shown that for the formation of descriptors for the classifiers of the functional state of the respiratory system, it is advisable to use the monitoring signals of pneumogram and lung gas exchange, which reflect the systemic rhythms responsible for variations in the breathing rhythm. Since it is very difficult to obtain such signals in resuscitation conditions, an analysis of the monitoring electrocardiosignal was proposed as an alternative. A method of forming descriptors for constructing classifiers of the functional state of the respiratory system, based on the analysis of this signal, has been developed. As a result of the implementation of the method, the signals of slow waves, reflecting variations in the breathing rhythm, are extracted from the monitoring electrocardiosignal by means of exploratory analysis in the frequency range of the breathing rhythm and subsequent wavelet analysis in the frequency range corresponding to the frequency range of the breathing rhythm determined as a result of the exploratory analysis. The components of the relevant strings of the wavelet plane are used to calculate descriptors of*

a trained neural network, which makes a decision on assigning the current state of the respiratory system to the tested state.

Conclusion. *It is shown that the relevant strings of the wavelet planes are correlated with the respiratory system, and by means of their Fourier analysis, descriptors can be identified, intended for training neural network classifiers of the functional state of the respiratory system.*

Keywords: *cardiac rhythm; respiratory system; systemic rhythms; Fourier transform; wavelet-transform; breathing rhythm; trained classifier; descriptor.*

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

Funding*: The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90058.*

For citation: Myasnyankin M. B., Philist S. A., Kiselev A. V., Kuzmin A. A. Formation of Descriptors for Classifiers of the Functional State of the Respiratory System Based on Spectral Analysis of the Electrocardio Signal. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(3/4): 8–28. (In Russ.)

Received 01.07.2020 *Accepted 06.08.2020* *Published 30.11.2020*

***

Введение

Необходимость системного подхода к оценке функционирования человеческого организма в конкретных условиях жизнедеятельности была осознана еще древними врачами Востока [1]. Кардиореспираторная система, состоящая из сердечно-сосудистой системы (ССС) и системы дыхания (СД), является наиболее чутким индикатором физиологического состояния организма, поэтому актуальным направлением исследования является формирование предикторов функционального состояния этих систем посредством анализа динамики их взаимодействия на определенном промежутке времени.

Фундаментальным свойством организма является функционирование его систем в определенных ритмах, с определенной «ритмичной вариабельностью» [2; 3]. Ритм дыхания (РД) формируется на основе рецепторной информации, получаемой от хемо- и механорецепторов, что позволяет центральному регулятору дыхания подбирать энергетически оптимальные режимы вентиляции легких. Респираторное ритмообразование у людей в значительной мере зависит от их психоэмоционального состояния, что обусловлено влиянием лимбической системы на деятельность дыхательного центра. В отличие от кардиоритма анализ РД менее освещен в научной литературе. Тем не менее известно ряд экспериментальных работ, в которых показано, что электромиограмма дыхательных мышц является индикатором состояния дыхательной системы. В этих работах показано, что электрическая активность дыхательных мышц является информативным параметром при диагностике нарушений функционального состояния СД [4; 5; 6].

Биоритмы организма несут информацию о функциональном состоянии его систем и подсистем. Следовательно, анализ вариабельности биоритмов дает возможность оценивать функциональное состояние системы в целом, особенно на этапах переходных состояний, когда происходят качественные изменения. У человека в этом плане наиболее изучена вариабельность сердечного ритма (RR-интервалы). При этом убедительно показано, что методы динамического анализа биоэлектрических сигналов позволяют диагностировать критическое состояние миокарда. У человека принято выделять четыре группы основных волновых пиков: HF-диапазон – от 0,15 до 0,4 Гц; LF – от 0,04 до 0,15 Гц; VLF в диапазоне от 0,003 до 0,04 Гц и ULF в диапазоне от 0,0001 до 0,003 Гц [7; 8; 9].

Для исследования биоритмов в живом организме, как правило, используют электрокардиосигнал (ЭКС). ЭКС уникален тем, что в нем можно наблюдать все вышеперечисленные волны в виде модуляции основного ритма ССС волнами более высокого порядка. Так как основной ритм ССС является квазипериодическим сигналом, то в спектр ЭКС является сплошным, что затрудняет выделение из него медленных волн.

Упрощенная модель управления кардиоритмом и РД в кардиореспираторной системе представлена на рисунке 1. Управление кардиоритмом осуществляется как со стороны ССС, так и со стороны СД. СД и ССС связаны между собой как по системе кровообращения, так и по информационным связям. Система кровообращения хорошо изучена, и связи через нее между отдельными функциональными узлами кардиореспираторной системы показаны жирными линиями (см. рис. 1). Что же касается информационных связей, то относительно них в литературе высказываются только ряд гипотез, часть из которых являются альтернативными.

Синусовый узел является автономным осциллятором с резонансной частотой около 1 Гц. Под действием управляющих факторов его частота может замедляться (парасимпатическое влияние) или ускоряться (симпатическое влияние). Целью вегетативного управления кардиоритмом является стабилизация артериального давления (АД). Однако на волновую структуру ЭКС оказывает влияние не только вегетативная нервная система, но и центральная нервная система (ЦНС).

HF-волны представлены в спектре ЭКС одним пиком в области 0,2… 0,3 Гц. Наличие этих волн определяет СД и их пик в спектральной области совпадает, как правило, с РД. Модуляция кардиоритма РД окончательно не расшифрована. Существует ряд гипотез, объясняющих этот процесс. Наиболее известные из них связывают эту модуляцию с влиянием рецепторов растяжения легких на синусовый узел, с управляющими сигналами от ЦНС, с

механизмами регуляции АД, изменением газового состава крови в процессе дыхания. Во всех случаях наблюдаются феномены, при которых модуляция кардиоритма РД не вписывается в выдвинутые гипотезы. Также исследователи обращают внимание на возможность появления в спектре HF пиков, не связанных с РД.

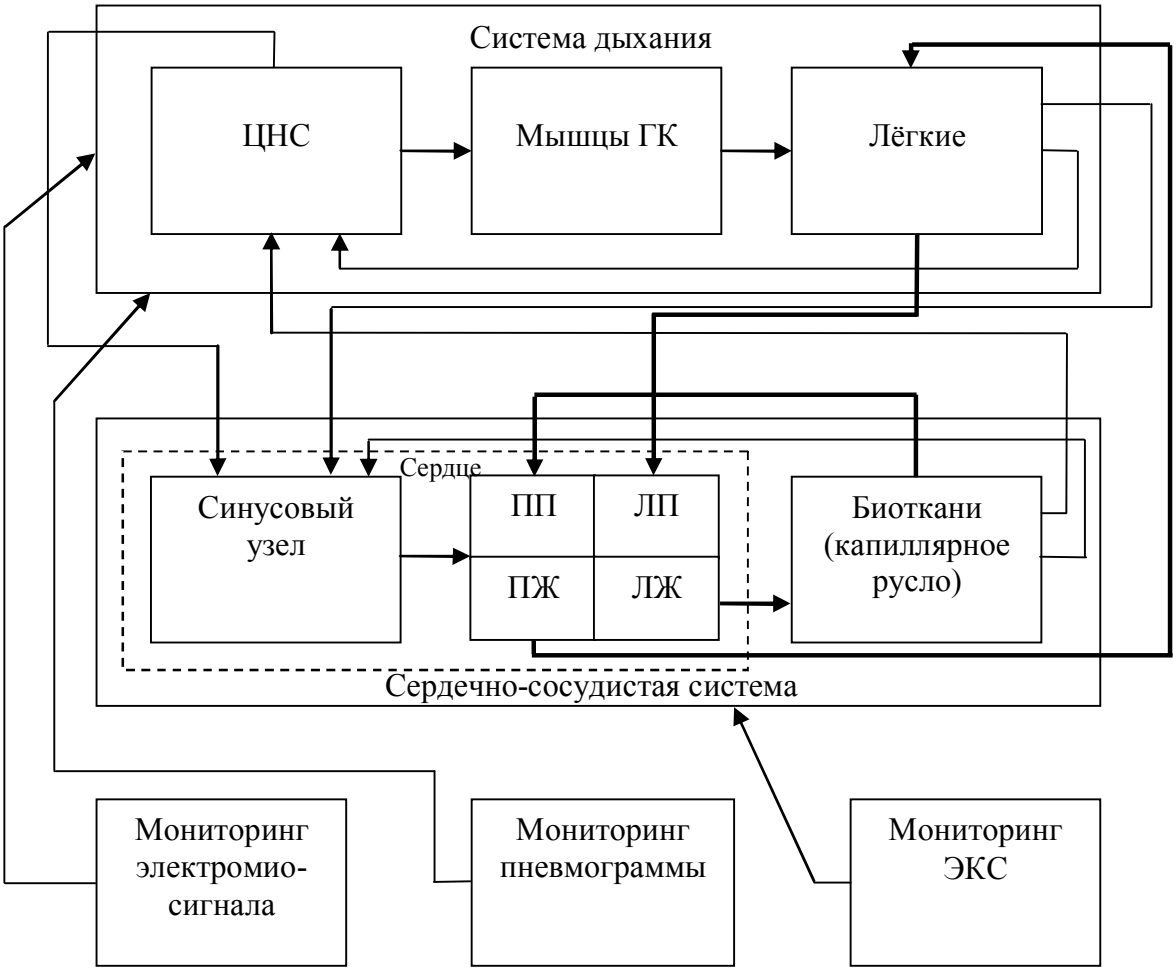

Рис. 1. Упрощенная модель кардиореспираторной системы: ПЖ – правый желудочек; ЛЖ – левый желудочек; ПП – правое предсердие; ЛП – левое предсердие; жирные линии – направления кровотока; тонкие линии – информационные потоки

Fig. 1. Simplified model of the cardiorespiratory system: RV – right ventricle; LV – left ventricle; PP – right atrium; LP – left atrium. Bold lines indicate the direction of blood flow; thin lines indicate information flows

LF-волны представлены спектром с пиком в области 0,1 Гц. Это так называемые волны Л. Траубе с периодом 10 с. Как и в случае с HF, о генезисе волн LF выдвинуто несколько гипотез. В них формирование ритма 0,1 Гц объясняется механизмами барорефлекторного, центрального и миогенного происхождения. На практике анализ этого ритма используется для оценки состояния

симпатической регуляции сердечного ритма [7; 9].

Наименее изученным является VLF-диапазон, которому соответствуют медленные волны с периодом 25…330 с. Сложности исследования этого диапазона состоят в том, что на спектре ЭКС присутствует довольно значительная нулевая гармоника (постоянная составляющая сигнала), на фоне которой весьма сложно различить пики очень низкочастотных колебаний. Генезис этих волн, так же как и на HF и LF, объясняют множество гипотез. Одна из них, изложенная в [9], полагает, что в основе вариабельности РД лежит механизм газообмена. Если это предположение верно, то интенсивность легочного газообмена, которая отражает скорость потребления кислорода, имеет структуру медленных волн второго порядка и может быть использована как маркер функционального состояния (ФС) СД. При этом механизм оптимального поддержания напряжения CO_2 в артериальной крови осуществляется ЦНС посредством обратных связей по вариациям параметров газообмена. Но для анализа таких показателей внешнего дыхания необходима длительная запись пневмограммы и регистрация легочного газообмена. Такие параметры снять весьма сложно, так как для этого необходимо специальное оборудование, позволяющее осуществление непрерывной записи сигналов на интервале не менее 30 мин.

Материалы и методы

Для формирования дескрипторов для классификаторов ФС СД используются сигнал электромиограммы (ЭМГ), снимаемый с мышц, обеспечивающих движение грудной клетки (ГД), и мониторинг параметров легочного газообмена (см. рис.1). Исследования показали, что эти сигналы варьируются от индивидуума к индивидууму, поэтому для формирования дескрипторов необходим переход к относительным показателям, которые могут быть получены на основе спектрального анализа этих процессов или на основе анализа их взаимных спектров [10; 11]. Сами же дескрипторы должны отображать вариабельность дыхательного ритма, которая является релевантным показателем ФС СД [9]. Как показано в [9], вариабельность ритмов СД проявляется в области медленных волн, что требует длительного мониторинга сигналов для ее надежного анализа. На рисунке 2 показан пример динамики потребления кислорода и выделения углекислого газа у здорового человека, которая представлена медленными волнами второго порядка [9].

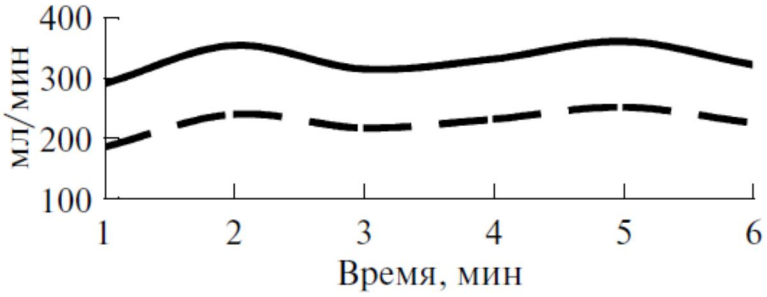

Рис. 2. Индивидуальная динамика потребления кислорода (сплошная линия) и выделения CO_2 (пунктирная линия) у здорового человека

Fig. 2. Individual dynamics of oxygen consumption (solid line) and CO2 release (dotted line) in a healthy person

К сожалению, в условиях реанимации провести длительный мониторинг такого сигнала не представляется возможным. Например, регистрация параметров легочного газообмена за каждый дыхательный цикл посредством метабографа Ultima PFX (США) требует осуществления дыхания через лицевую маску, что неприемлемо в условиях реанимации или в процессе активной жизнедеятельности. Выходом из этой ситуации является использование в качестве носителей информации о ФС СД хорошо изученных и легко доступных для длительного мониторинга ЭКС, которые несут информацию о РД благодаря рецепторным связям, осуществляющим гомеостаз артериального давления (АД) [7].

Если моногармонический сигнал $s(t) = S \cdot \cos(\Omega t + \psi)$ модулирует другой моногармонический сигнал $u(t) = U_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi)$, то мгновенное значение для амплитудно-модулированного сигнала $x(t)$ выражается как [12]:

$$x(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi) + \frac{U_0 M}{2}\begin{Bmatrix} \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi + \psi] + \\ + \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi - \psi] \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где $M = \Delta U_m / U_0$ – коэффициент модуляции, $\Delta U_m = k_{ам} \cdot S_0$, $k_{ам}$ – коэффициент пропорциональности.

Если несущий сигнал является полигармоническим, то выражение (1) применяется к каждой гармонической составляющей сигнала. Это приводит к расширению спектра в окрестности соответствующей гармоники, и спектр приближается к сплошному. На рисунке 3 представлен спектр одного из отведений ЭКС, записанного с частотой дискретизации 100 Гц на интервале 5 мин, который позволяет наблюдать как дыхательные волны, так и волны VLF-диапазона.

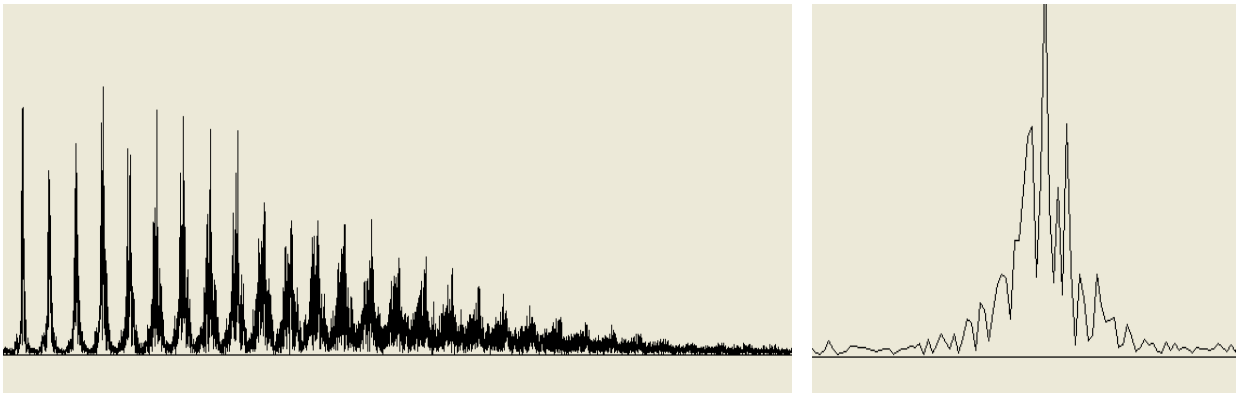

Рис. 3. Спектр электрокардиосигнала (слева) и эпюра цуга спектральной волны, соответствующей ритму дыхания (справа)

Fig. 3. Electrocardiosignal Spectrum (left) and Zug plot of the spectral wave corresponding to the breathing rhythm (right)

Спектр ЭКС (см. рис. 3) состоит из спектральных цугов, центры которых являются кратными основной гармоники ЭКС, т. е. приблизительно 1 Гц. Нас же в данном случае интересует только спектр РД, который дислоцируется в области первого цуга и эпюра которого показана справа на рисунке 3. Однако из такого спектра выделить вариабельность дыхательного ритма весьма сложно [13]. Поэтому для исследования медленных волн в дыхательном цуге будем использовать частотно-временные преобразования, наиболее распространенным среди которых является вейвлет-преобразование [11].

Вейвлет-преобразование позволяет определить мгновенное значение цуга и, следовательно, вариабельность его частотного наполнения во времени. Чтобы понять морфологию вейвлет-плоскости амплитудно-модулированного сигнала, промодулируем несущую частоту 1 Гц аддитивной смесью сигналов с частотами 0,01 Гц, 0,02 Гц и 0,04 Гц. Эпюра одного периода полученного сигнала представлена на рисунке 4 (вверху).

В исследуемом сигнале присутствуют три медленных волны, выделение которых посредством преобразования Фурье не представляется возможным [13]. На рисунке 4 (внизу) показана вейвлет-плоскость этого тестового сигнала. На ней мы наблюдаем только временные дислокации гребней медленных волн, дислоцированные вдоль частоты 0,018 Гц. В области средней частоты модулирующих волн мы наблюдаем колебания, соответствующие огибающей модулированного сигнала. Таким образом, как частотный, так и частотно-временной анализ не являются достаточным инструментарием для выделения медленных волн из квазипериодического сигнала и анализа их вариабельности.

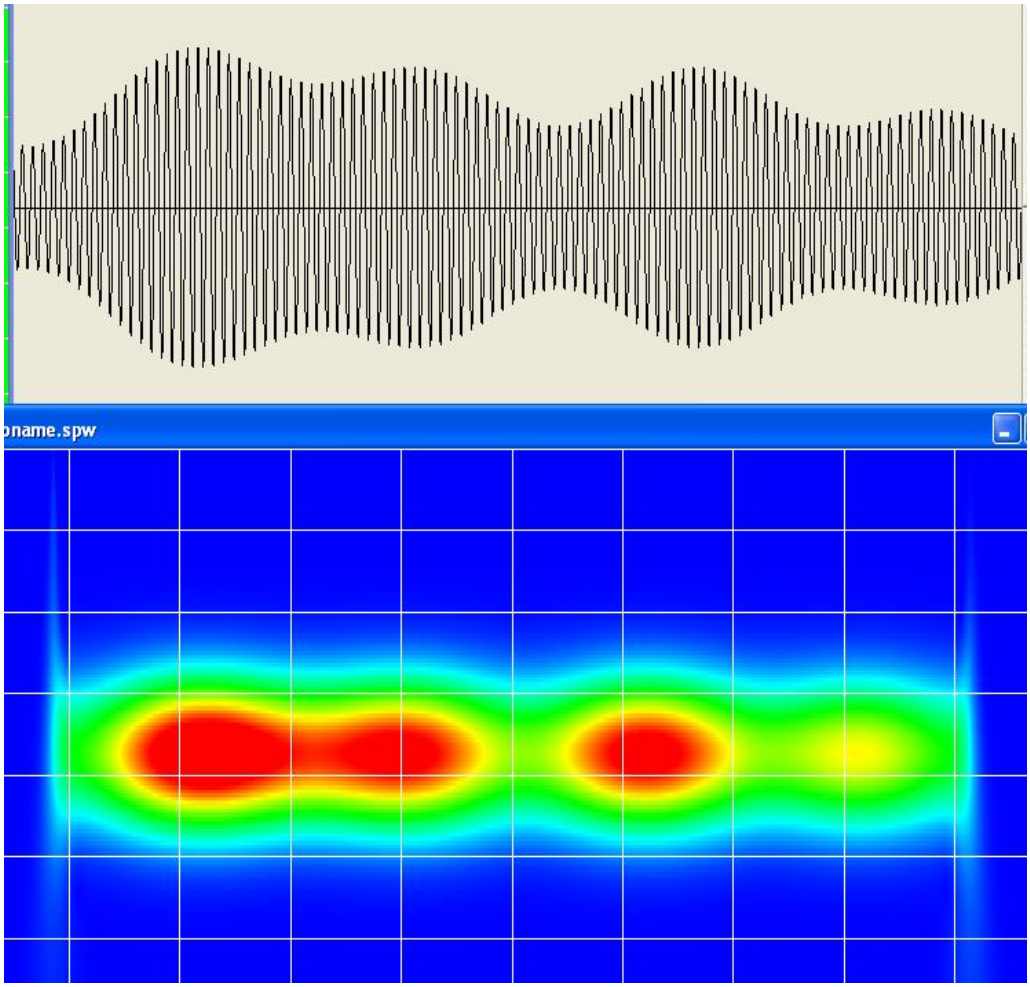

Рис. 4. Вейвлет-преобразование модулированного сигнала: исходный модулированный сигнал – вверху; вейвлет плоскость исходного сигнала – внизу

Fig. 4. Wavelet transform of the modulated signal: the sourse modulated signal is at the top; wavelet plane of the sourse signal is at the below

Проиллюстрируем технологию формирования признакового пространства, предназначенного для оценки ФС СД на основе анализа вариабельности РД. Для этого воспользуемся отсчетами спектра ЭКС, эпюра которого представлена на рисунке 3. Механизм изменений частоты сердечного ритма при дыхании связан с функционированием барорефлекторной системы стабилизации артериального давления (АД). Известно, что сердечный выброс уменьшается на вдохе и растет на выдохе вследствие изменения давления в грудной полости, что вызывает колебания АД [7].

Рассмотрим морфологию вейвлет-плоскости ЭКС. На рисунке 5 представлен пример вейвлет-плоскости ЭКС длительностью 3 мин. Изображение содержит 300 строк (вейвлетов), масштаб вейвлетов изменялся с шагом 5. Таким образом, при параметрах дискретизации ЭКС и формирования вейвлет-плоскости имеем нижнюю частоту на вейвлет-плоскости 0,25 Гц и верхнюю частоту 40 Гц. Контрастные полосы

(рис. 5) соответствуют гармоникам кардиоцикла: гармоника 1,2 Гц занимает полосу шириной 0,64 Гц; гармоника 2,4 Гц – 0,4 Гц; гармоника 3,6 Гц занимает полосу частот 0,6 Гц. Волнам РД соответствуют вертикальные полосы в нижней части вейвлет-плоскости, которые характеризуют вариабельность РД по частоте.

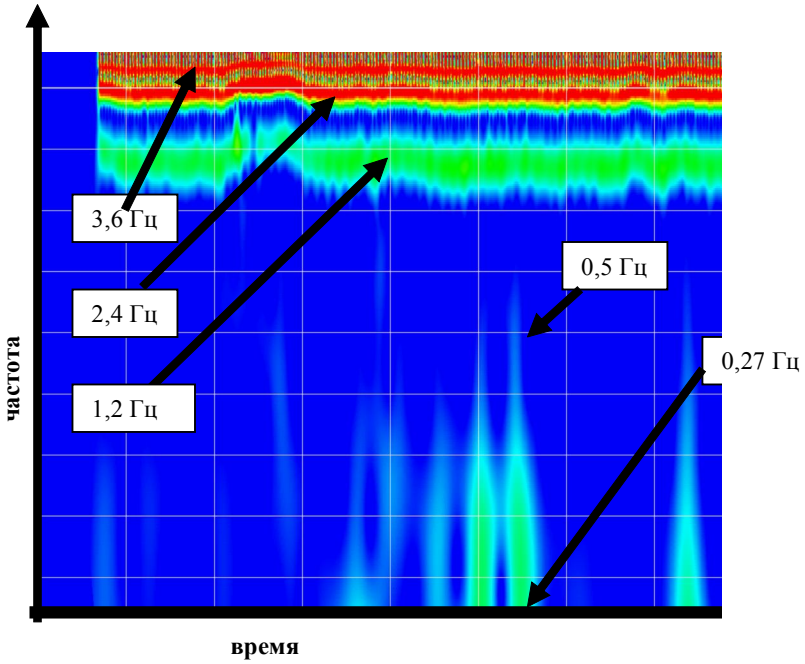

Рис. 5. Морфология вейвлет-плоскости электрокардиосигнала

Fig. 5. Morphology of the wavelet plane of the electrocardiosignal

Для оценки вариабельности ритма дыхания во времени рассмотрим одну строку вейвлет-плоскости, дислокация которой соответствует частоте РД. Эпюра этой строки приведена на рисунке 6. Она характеризует так называемую энергетическую вариабельность, т. е. изменение интенсивности соответствующей гармоники цуга РД во времени.

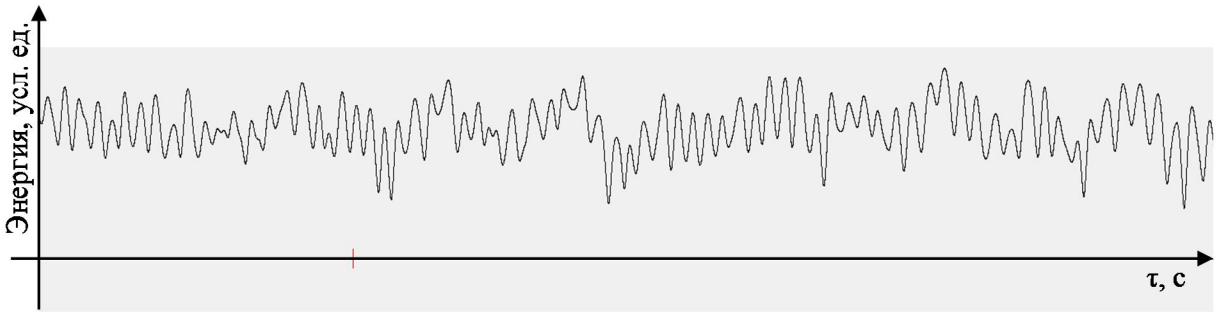

Рис. 6. Эпюра строки вейвлет-плоскости электрокардиосигнала, соответствующая одной из частот цуга ритма дыхания

Fig. 6. Plot of the line of the wavelet plane of the electrocardiosignal corresponding to one of the frequencies of the Zug of the respiratory rhythm

Наряду с энергетической вариабельностью выделим частотную вариабельность, под которой будем понимать вариабельность полосы частот, занимаемой дыхательным цугом во времени. Для формирования дескрипторов по результатам анализа изображения (см. рис. 5) необходимо выявить изменения в выделенных сегментах, происходящие при патологических процессах, для чего каждый сегмент вейвлет-плоскости должен быть охарактеризован некоторым вектором, состоящим из минимального числа компонент. В данном случае две информативные зоны (волны первого и второго порядка) удалось выделить при одних и тех же параметрах синтеза изображения. Спектр Фурье строки вейвлет-плоскости морфологически аналогичен спектру цуга РД, показанному справа на рисунке 3, и морфологически, и топологически (в смысле частотной дислокации) аналогичен спектру дыхательного ритма, полученного посредством спектрального анализа пневмограммы и представленного на рисунке 7 [9].

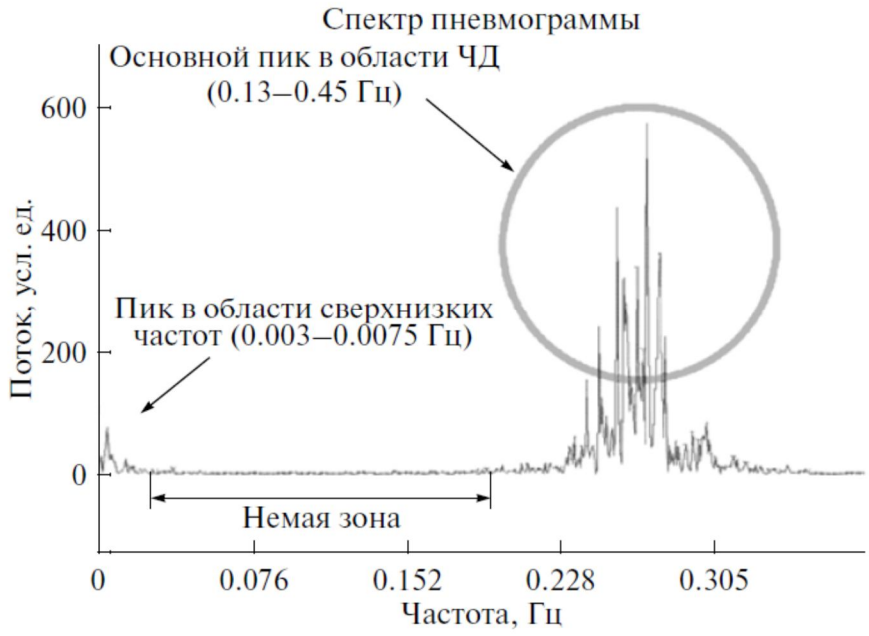

Рис. 7. Цуг спектра ритма дыхания, полученный по результатам анализа Фурье-сигнала пневмограммы

Fig. 7. Zug of the respiratory rhythm spectrum obtained from the results of the Fourie-analysis of the pneumogram signal

Суммируя вышеизложенное, можем представить метод формирования дескрипторов для индивидуума (неизвестного образца), предназначенных для классификаторов ФС СД посредством спектрального анализа мониторингового ЭКС. Метод включает сле-

дующие этапы обработки мониторингового ЭКС:

1) определяется спектр Фурье ЭКС с выделением цуга РД;

2) определяется полоса частот, занимая цугом РД;

3) строится вейвлет-плоскость ЭКС с параметрами, позволяющими наблюдать на ней строки с цугами РД;

4) определяются спектры Фурье строк вейвлет-плоскости, которые соответствуют полосе частот РД;

5) определяются показатели вариабельности в спектрах строк вейвлет-плоскости (показатели вариабельности по времени), соответствующих цугам РД;

6) определяются показатели вариабельности в строках вейвлет-плоскости по частоте.

Таким образом, метод позволяет получить две группы дескрипторов, определяющих вариабельность РД. Этим двум группам дескрипторов соответствуют две группы классификаторов, решения которых объединяются посредством агрегатора [14; 15].

Результаты и их обсуждение

Процесс реализации метода формирования дескрипторов для классификаторов ФС СД рассмотрим на конкретном ЭКС. Согласно вышеизложенного метода, для формирования дескрипторов необходимо определить цуг РД в спектре Фурье ЭКС. Для построения вейвлет-плоскости ЭКС необходимо выбрать параметры построения вейвлет-плоскости таким образом, чтобы на вейвлет-плоскости были отражены строки, соответствующие частотному диапазону полученного цуга РД.

Структура классификатора ФС СД построена по иерархическим принципам, изложенным в [14; 15]. Согласно этим принципам, вектор информативных признаков разбит на подвекторы, каждому из которых соответствует свой «слабый» классификатор. В процессе самоорганизации такой иерархической структуры классификаторов устанавливается «вес» каждого «слабого» классификатора (дескрипторов «слабого» классификатора) в процедуре принятия решения в иерархической структуре классификаторов.

На верхнем уровне иерархической структуры классификаторов находятся два классификатора, дескрипторы которых определяют вариабельность РД по времени и вариабельность РД по частоте. Функционально они выполняют классификацию спектра РД, получаемого на основе анализа Фурье, сигнала пневмограммы и анализа вариабельности потребления кислорода. Дескрипторы этих классификаторов формируются «слабыми» классификаторами более низкого иерархического уровня. В качестве «слабых» классификаторов нижнего иерархического уровня используются классификаторы с дескрипторами, полученными на основе анализа строк вейвлет-плоскости, расположенных в области цуга РД.

На рисунке 8 показана вейвлет-плоскость ЭКС, состоящая из 800 строк. Ее строки перекрывают частотный диапазон РД, который лежит в нижней части вейвлет-плоскости. Дискретный сигнал ЭКС был получен с шагом дискретизации 100 Гц. Для получения вейвлет-плоскости использовалось 11000 отсчетов ЭКС и вейвлеты, масштаб которых изменялся с шагом $\eta = 8$. При таких входных параметрах вейвлет-плоскость покрывает частотный диапазон от 40 Гц до 0,125 Гц.

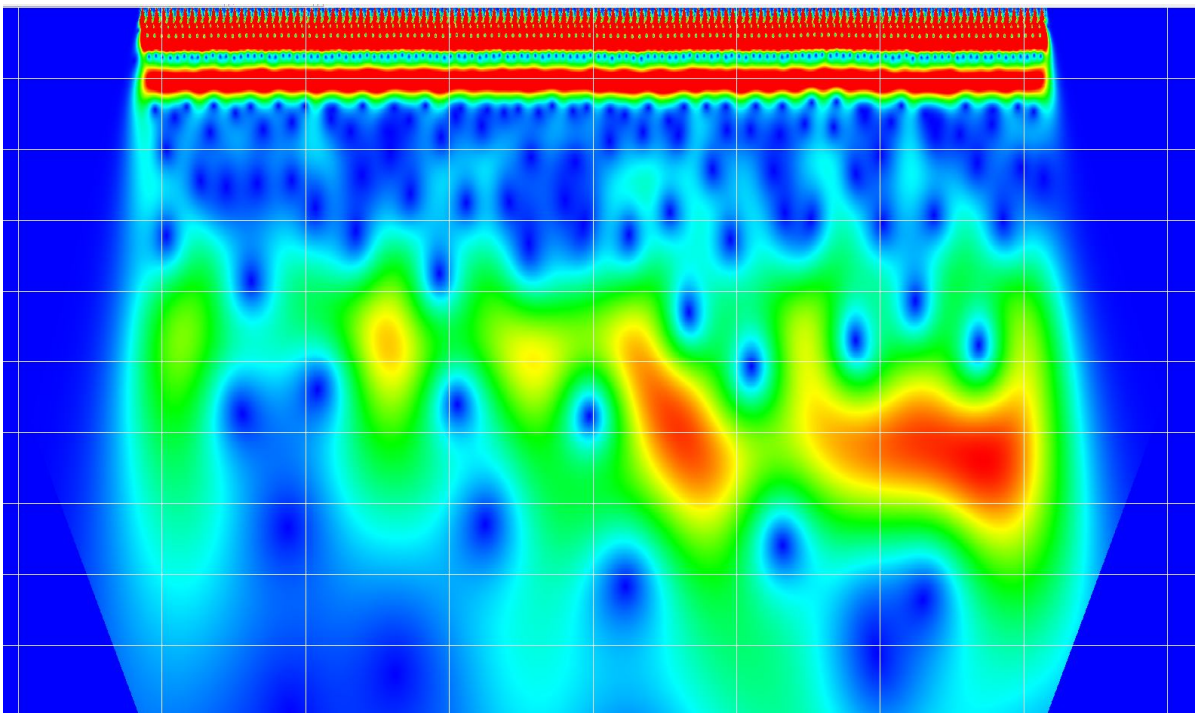

Рис. 8. Вейвлет-плоскость электрокардиосигнала с сектором медленной волны второго порядка с модуляцией дыхательного цикла волнами 15…20 с

Fig. 8. Wavelet plane of an electrocardiosignal with a sector of a second-order slow wave with modulation of the respiratory cycle by waves 15 ... 20 s

На рисунке 8 область цуга РД покрывает строки с номерами от 250 до 800, согласно спектра Фурье, представленного на рисунке 7. На вейвлет-плоскости отображены РД, которые модулируются системными ритмами с периодом приблизительно 15… 20 с. Развертка нескольких строк, находящихся в секторе РД, показана на рисунке 9. Здесь можно видеть, что волна РД частотой 0,2 Гц модулируется медленной волной более высокого порядка, в данном случае волной 0,04 Гц.

«Слабые» классификаторы могут быть построены по каждой строке из этого диапазона. Но рисунок 9 указывает на чрезмерную корреляцию соседних строк этой вейвлет-плоскости, что говорит о слабой вариабельности РД по частоте. Это не противоречит ни теоре-

тическим, ни экспериментальным исследованиям, так как частота дыхательного ритма модулируется волнами VLF, период которых составляет 25…330 с (см. рис. 2).

Для снижения корреляционных связей строк вейвлет-плоскости было предложено увеличить величину шага изменения масштаба вейвлет-плоскости. На рисунке 10 показана вейвлет-плоскость ЭКС, содержащая 20 строк и построенная при шаге изменения масштаба вейвлетов η = 230. Она имеет граничные частоты 40…0,182 Гц.

На рисунке 11 представлена развертка строк вейвлет-плоскости рисунка 10, принадлежащих частотному диапазону РД. Здесь это строки, начиная с десятой (0,345 Гц) и кончая двадцатой (0,182 Гц).

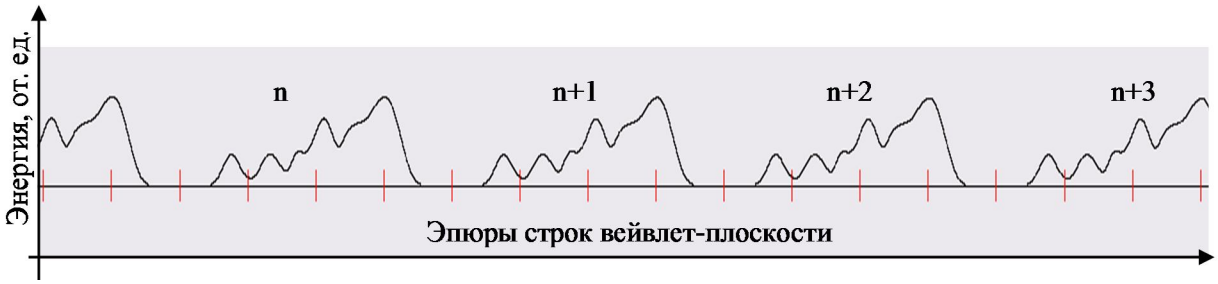

Рис. 9. Развертка строк вейвлет-плоскости в сегменте дыхательного ритма: волна дыхания (0,2 Гц), модулированная волнами 0,04 Гц (612 строка вейвлет-плоскости)

Fig. 9. Scanning of the plane lines in the segment of the respiratory rhythm: a breath wave (0,2 Hz) modulated by 0,04 Hz waves (612 line of the wavelet plane)

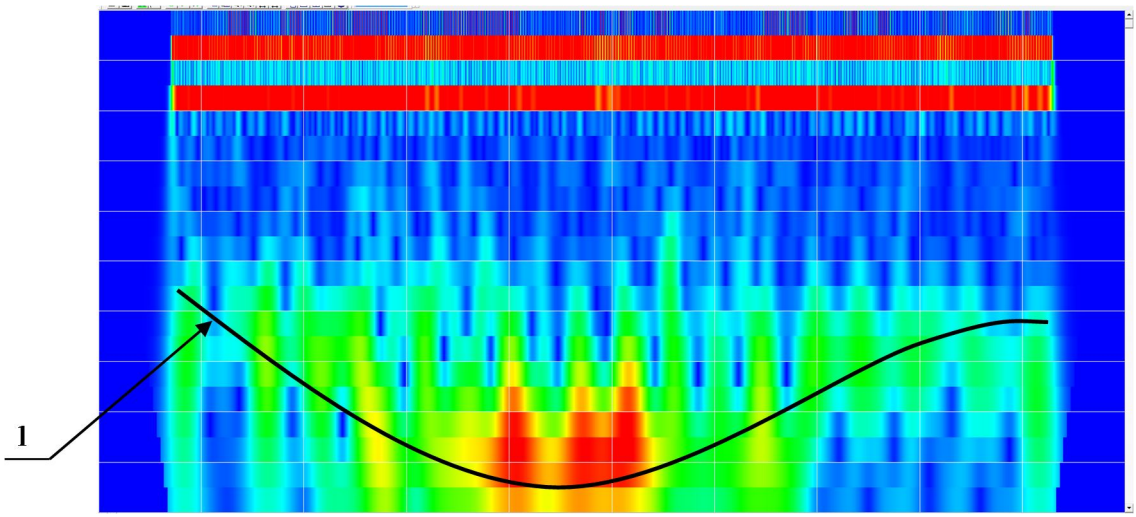

Рис. 10. Изображение вейвлет-плоскости электрокардиосигнала с увеличенным шагом изменения масштаба вейвлетов: 1 – интерполяционная кривая, аппроксимирующая вариацию частоты ритма дыхания

Fig. 10. Image of the wavelet plane of the electrocardiosignal with an increased step of changing the of the wavelet: 1 – an interpolation curve approximating the variation of the respiratory rate

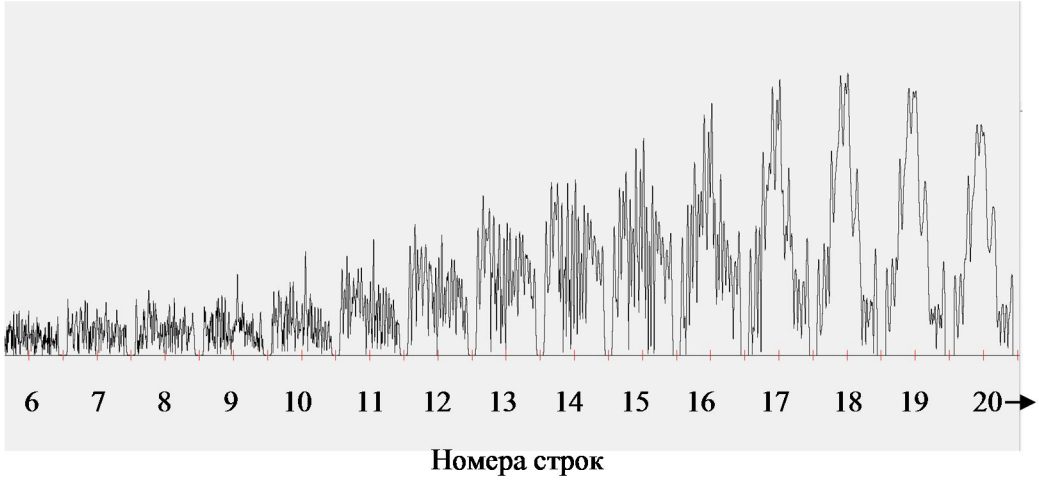

Рис. 11. Развертка строк вейвлет-плоскости в сегменте дыхательного ритма: волна дыхания (0,2 Гц), модулированная волнами 0,04 Гц (612 строка вейвлет-плоскости)

Fig. 11. Scanning of wavelet plane lines in the segment of the respiratory rhythm: a breath wave (0,2 Hz), modulated by 0,04 Hz waves (612 lines of the wavelet plane)

В каждом частотном цуге на рисунке 11 отражена вариация частоты в строке вейвлет-плоскости, к которой принадлежит данный цуг. Другими словами, в цуге представлена вариация частотных составляющих РД, которые представлены данной строкой вейвлет-плоскости. Анализ этих частотных составляющих показал, что цугам вейвлет-плоскости, строки которых лежат в области РД, соответствуют длины волн с периодами 20…30 с, что позволяет отнести их к диапазону VLF. Цуги, которые принадлежат строкам вейвлет-плоскости, частоты которых лежат в диапазоне между частотами кардиоритма и частотами РД, несут медленные волны первого порядка, которым, как правило, соответствует системный ритм 0,1 Гц. Это отчетлива видно на цугах, показанных на рисунке 11, на котором период медленных волн в цугах постепенно уменьшается при продвижении по цугам, от находящихся в левой части рисунка, к цугам, находящимся справа. Таким образом, вопрос построения дескрипторов для «слабых» классификаторов по этим цугам сводится к определению спектра Фурье соответствующего цуга.

Для выявления вариации спектра РД по частоте в фиксированные моменты времени необходимо сформировать массивы, в которые будут записаны значения частот в строках, покрывающих диапазон РД, для каждого значения сдвига вейвлет-плоскости. Например, если на рисунке 11 РД принадлежат строки с номерами 13…20, то для формирования первого массива выбираем сдвиг, равный одному отсчету, и записываем в массив кортеж из восьми вейвлет-коэффициентов, взятых из каждой из восьми строк при сдвиге 1. Такую процедуру выполняем для всех значений сдвигов вейвлет-плоскости. Вышеописанная процедура эквивалентна транспонированию сег-

мента вейвлет-плоскости, соответствующего диапазону частот РД. В каждой строке транспонированного сегмента находим максимальное значение вейвлет-коэффициента и по полученным максимальным значениям строим интерполяционную кривую, пример которой показан на рисунке 10. Интерполяционную кривую представляем полиномом N-го порядка, коэффициенты которого определяют дескрипторы по частотным вариациям спектра РД.

При формировании вышеописанного пространства информативных признаков осуществлялся разведочный анализ вейвлет-плоскостей ЭКС в диапазоне РД посредством методики и программного обеспечения, описанного в [16; 17].

При построении дескрипторов для классификаторов ФС СД полагаем, что основная релевантная информация сосредоточена в медленных волнах. Поэтому задача формирования признакового пространства сводится к выделению медленных волн в исследуемом сигнале и их адекватному описанию в сформированном пространстве информативных признаков.

С целью выбора оптимальной апертуры вейвлет-преобразования ЭКС необходим анализ вейвлет-плоскостей. Но для анализа вейвлет-изображений ЭКС необходимо иметь априорные данные об их структуре, которые в настоящее время отсутствуют. Это объясняется тем, что существуют различные способы реализации вейвлет-преобразования, присутствующие в различных пакетах математической обработки данных, а также различные способы представления изображений, которые получаются в результате вейвлет-анализа.

При отсутствии априорных данных о структуре изображения для его синтеза целесообразно использовать метод адаптивного квантования мод, который основан на предположении, что различные участки изображения могут группироваться по признакам, отражающим определенные свойства изображаемых объектов [16]. Для вейвлет-преобразования ЭКС к таким свойствам объекта необходимо отнести структуру изображения в области волн первого и второго порядка.

В результате анализа многочисленных вейвлет-плоскостей ЭКС, а также исследования работ других ученых [10; 18] был сделан вывод, что ФС СД зависит от характера модуляции медленных волн менее высокого порядка медленными волнами более высокого порядка. Для построения классификаторов ФС СД было предложено использовать иерархические системы классификаторов, основанные на принципе усиления показателей качества «слабых» классификаторов [14; 15]. В качестве дескрипторов «слабых» классификаторов использовались дескрипторы, построенные на анализе вариабельности ритма дыхания, показатели которой могут быть получены путем анализа сигнала

пневмограммы и показателей газообмена легких. Было показано, что аналогичная информация о вариации РД может быть получена путем анализа мониторингового сигнала ЭКС, апертура наблюдения которого соответствует длинам волн VLF диапазона.

Для определения показателей вариабельности РД использовался сегмент вейвлет-плоскости ЭКС, строки которого принадлежали частотному диапазону, занимаемому РД. Так как частотный диапазон РД является уникальным для каждого индивидуума, то для его определения вычислялся спектр Фурье ЭКС и анализировался спектральный состав его цуга, принадлежащего РД. По определенному частотному диапазону цуга вычислялись параметры для построения вейвлет-плоскости ЭКС.

Выводы

Предложенный метод формирования дескрипторов для классификаторов ФС СД, включающий разведочный анализ спектрального диапазона РД, построение вейвлет-плоскости мониторинговой ЭКС, перекрывающий частотный диапазон РД, и определение вариации ритма дыхания по релевантным строкам вейвлет-плоскости, позволил выделить из мониторингового ЭКС медленные волны, соответствующие РД и волне второго порядка. Анализ спектральных характеристик этих волн позволяет сформировать пространство информативных признаков для классификаторов ФС СД, в том числе и классификаторов преморбидного состояния.

Для получения вейвлет-преобразования ЭКС использовалась программа SPWin7, разработанная под руководством профессора С. А. Филиста и используемая на кафедре БМИ Юго-Западного государственного университета для обработки биомедицинских сигналов [19].

Список литературы

1. Павлов С. Е., Кузнецова Т. Н. Адаптация и стресс в спорте // Актуальные вопросы медицинской реабилитации в современных условиях: сборник. М., 1999. С. 307–312.

2. Изучение сердечно-сосудистого и дыхательного синхронизма при различных режимах дыхания / Л. А. Носкин, А. В. Рубинский, А. П. Романчук, В. Н. Марченко, В. В. Пивоваров, А. Б. Черепов, Л. А. Заровкина // Патогенез. 2018. Т. 16, № 4. С. 90–96.

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

4. Ершов С. П., Перельман Ю. М. Электрофизиологическая характеристика дыхательных мышцу больных хроническим бронхитом // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. 1999. Вып. 5. С. 28–35.

5. Пиковая скорость выдоха и бронхиальное сопротивление у больных с внебольничной пневмонией / Ф. Ф. Тетенев, Т. С. Агеева, В. Ю. Даниленк, А. В. Дубаков // Сибирский медицинский журнал. 2005. Т. 58, № 8. С. 43–45.

6. Чучалин А. Г., Айсанов З. Р. Нарушение функции дыхательных мышц при хронических обструктивных заболеваниях легких // Терапевтический архив. 1988. Т. 60, № 7. С. 126–131.

7. Баевский Р. М., Берсенева А. П. Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний. М.: Медицина, 1997. 265 с.

8. Флейшман А. Н. Вариабельность ритма сердца и медленные колебания гемодинамики. Нелинейные феномены в клинической практике. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 194 с.

9. Гришин О. В., Гришин В. Г., Коваленко Ю. В. Вариабельность легочного газообмена и дыхательного ритма // Физиология человека. 2012. Т. 38, № 2. С. 87–93.

10. Белобров А. П., Кузьмин А. А., Филист С. А. Многомерная частотная селекция в задачах анализа медленных волн // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. № 2. С. 4–10.

11. Кассим К. Д. А., Филист С. А., Рыбочкин А. Ф. Компьютерные технологии обработки и анализа биомедицинских сигналов и данных: учеб. пособие / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2016. 209 с.

12. Нефедов В. М., Сигов А. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Юрайт, 2019. 266 с.

13. Гибридные технологии выделения медленных волн из квазипериодических сигналов / Р. А. Томакова, М. А. Ефремов, С. А. Филист [и др.] / Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 1(34). С. 66–73.

14. Филист С. А., Шаталова О. В., Ефремов М. А. Гибридная нейронная сеть с макрослоями для медицинских приложений // Нейрокомпьютеры. Разработка и применение. 2014. № 6. С. 35–39.

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

16. Использование метода адаптивного квантования мод при исследовании вейвлет-изображений электрокардиосигналов больных ишемической болезнью сердца / А. А. Грахов, А. А. Кузьмин, С. В. Пихлап, С. А. Филист // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск «Медицинские информационные системы». 2008. № 5(82). С. 76–79.

17. Томакова Р. А., Емельянов С. Г., Филист С. А. Интеллектуальные технологии сегментации и классификации биомедицинских изображений / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2012. 222 с.

18. Глас Леон, Мэки Майкл. От часов к хаосу: Ритмы жизни / пер. с англ. Р. И. Сельковой; под ред. Е. Е. Селькова. М.: Мир, 1991. 248 с.

19. Филист С. А., Зо Зо Тун, Горбатенко С. А. Программный модуль для кодирования QRS-комплексов на основе морфологических признаков // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. № 2. С. 24–29.

References

1. Pavlov S. E., Kuznetsova T. N. Adaptatsiya i stress v sporte. Aktual'nye voprosy meditsinskoi reabilitatsii v sovremennykh usloviyakh. Sbornik [Adaptation and stress in sports. Actual issues of medical rehabilitation in modern conditions. Collection]. Moscow, 1999, pp. 307–312. (In Russ.)

2. Noskin L. A., Rubinsky A. V., Romanchuk A. P., Marchenko V. N., Pivovarov V. V., Cherepov A. B., Zarovkina L. A. Izuchenie serdechno-sosudistogo i dykhatel'nogo sinkhronizma pri razlichnykh rezhimakh dykhaniya [Izuchenie cardio-vascular and respiratory synchronism in various modes of respiration]. *Patogenez = Pathogenesis*, 2018, vol. 16, no. 4, pp. 90–96. (In Russ.)

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

4. Ershov S. P., Perelman Yu. M. Elektrofiziologicheskaya kharakteristika dykhatel'nykh myshtsu bol'nykh khronicheskim bronkhitom [Electrophysiological characteristics of respiratory muscles in patients with chronic bronchitis]. *Byulleten' fiziologii i patologii dykhaniya = Bulletin of Physiology and Pathology of Respiration*, 1999, is. 5, pp. 28–35. (In Russ.)

5. Tetenev F. F., Ageeva T. S., Danilenk V. Yu., Dubakov A. V. Pikovaya skorost' vydokha i bronkhial'noe soprotivlenie u bol'nykh s vnebol'nichnoi pnevmoniei [Peak expiratory velocity and bronchial resistance in patients with community-acquired pneumonia]. *Sibirskii meditsinskii zhurnal = Siberian Medical Journal*, 2005, vol. 58, no. 8, pp. 43–45. (In Russ.)

6. Chuchalin A. G., Aisanov Z. R. Narushenie funktsii dykhatel'nykh myshts pri khronicheskikh obstruktivnykh zabolevaniyakh legkikh [Violation of the function of the respiratory muscles in chronic obstructive pulmonary diseases]. *Terapevticheskii arkhiv = Therapeutic Archive*, 1988, vol. 60, no. 7, pp. 126–131. (In Russ.)

7. Baevsky R. M., Berseneva A. P. Otsenka adaptatsionnykh vozmozhnostei organizma i risk razvitiya zabolevanii [Assessment of the adaptive capabilities of the body and the risk of developing diseases]. Moscow, Meditsina Publ., 1997. 265 p. (In Russ.)

8. Fleishman A. N. Variabel'nost' ritma serdtsa i medlennye kolebaniya gemodinamiki. Nelineinye fenomeny v klinicheskoi praktike [Heart rate variability and slow fluctuations of hemodynamics. Nonlinear phenomena in clinical practice]. Novosibirsk, SB RAS Publishing House, 2009. 194 p.

9. Grishin O. V., Grishin V. G., Kovalenko Yu. V. Variabel'nost' legochnogo gazoobmena i dykhatel'nogo ritma [Variability of pulmonary gas exchange and respiratory rhythm]. *Fiziologiya cheloveka = Human Physiology*, 2012, vol. 38, no. 2, pp. 87–93. (In Russ.)

10. Belobrov A. P., Kuzmin A. A., Filist S. A. Mnogomernaya chastotnaya selektsiya v zadachakh analiza medlennykh voln [Multidimensional frequency sequence in problems of analysis of slow waves]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2010, no. 2, pp. 4–10. (In Russ.)

11. Kassim K. D. A., Filist S. A., Rybochkin A. F. Komp'yuternye tekhnologii obrabotki i analiza biomeditsinskikh signalov i dannykh [Computer technologies of processing and analysis of biomedical signals and data]. Kursk, Southwest State University Publ., 2016. 209 p. (In Russ.)

12. Nefedov V. M., Sigov A. S. Radiotekhnicheskie tsepi i cignaly [Radio engineering circuits i signals]. Moscow, Yurayt Publ., 2019. 266 p. (In Russ.)

13. Tomakova R. A., Efremov M. A., Filist S. A., eds. Gibridnye tekhnologii vydeleniya medlennykh voln iz kvaziperiodicheskikh signalov [Hybrid technologies for the isolation of slow waves from quasi-periodic signals]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 1 (34), pp. 66–73. (In Russ.)

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

15. Filist S. A., Tomakova R. A., Ya Z. D. Universal'nye setevye modeli dlya zadach klassifikatsii biomeditsinskikh dannykh [Universal network models for problems of classification of biomedical data]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4 (43), pt. 2, pp. 44–50. (In Russ.)

16. Grakhov A. A., Kuzmin A. A., Pihlap S. V., Filist S. A. Ispol'zovanie metoda adaptivnogo kvantovaniya mod pri issledovanii veivlet-izobrazhenii elektrokardiosignalov bol'nykh ishemicheskoi bolezn'yu serdtsa [Using the adaptive mode quantization method in the study of wavelet images of electrocardiosignals of patients with ischemic heart disease]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. Tematicheskii vypusk "Meditsinskie informatsionnye sistemy" = News of the Southern Federal University. Technical sciences. Thematic issue "Medical Information Systems*", 2008, no. 5 (82), pp. 76–79. (In Russ.)

17. Tomakova R. A., Yemelyanov S. G., Filist S. A. Intellektual'nye tekhnologii segmentatsii i klassifikatsii biomeditsinskikh izobrazhenii [Intellectual technologies of segmentation and classification of biomedical images]. Kursk, Southwest State University Publ., 2012. 222 p. (In Russ.)

18. Glas Leon, Mackie Michael. Ot chasov k khaosu: Ritmy zhizni [From hours to chaos: Rhythms of life]; ed. by E. E. Selkova. Moscow, Mir Publ., 1991, 248 p. (In Russ.)

19. Filist S. A., Zo Zo Tun, Gorbatenko S. A. Programmnyi modul' dlya kodirovaniya QRS-kompleksov na osnove morfologicheskikh priznakov [Software module for coding QRS-complexes based on morphological features]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2010, no. 2, pp. 24–29. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Мяснянкин Максим Борисович, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: 79606039503@mail.ru

Maksim B. Myasnyankin, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: 79606039503@mail.ru

Филист Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: SFilist@gmail.com

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

Киселев Алексей Викторович, канд. техн. наук, преподаватель, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kiselevalexey1990@gmail.com

Alexey V. Kiselev, Cand. of Sci. (Engineering), Teacher, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: kiselevalexey1990@gmail.com

Кузьмин Александр Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ku3bmin@gmail.com

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

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.89

Классификации биологических объектов на основе многомерного биоимпедансного анализа

А. В. Мирошников[1], О. В. Шаталова[1] ✉, Н. С. Стадниченко[1], Л. В. Шульга[1]

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

✉ e-mail: yulia.orlova@gmail.com

Резюме

Цель исследования. *В современном российском здравоохранении задача длительного наблюдения за состоянием человека практически всегда связана или с его госпитализацией, или с арендой дорогостоящих мониторных систем. Поэтому целью исследования является развитие методов диагностики, основанных на гибридном использовании многочастотного зондирования биоматериалов, позволяющих создать мониторинговые интеллектуальные системы поддержки принятия решений по диагностике инфекционных заболеваний.*

Методы. *Классификаторы риска инфекционных заболеваний основаны на предложенном методе биоимпедансного анализа и выполнены на обучаемых нейронных сетях. Метод получения дескрипторов основан на многочастотном зондировании биоматериала. По результатам многочастотного зондирования строились графики Коула. Используя итерационные алгоритмы и эти графики, были получены модели Войта импеданса биоматериала. Параметры этих моделей используются как дескрипторы для обучаемых классификаторов.*

Результаты. *В качестве примера были построены модель классификатора больных пневмонией с четко поставленным диагнозом и группа волонтеров без легочных патологий. Из полученной обучающей выборки методом скользящего экзамена формируются контрольные выборки. Показатели качества диагностики предлагаемого способа сравнивались, как с прототипом, с показателями качества рентгеновских исследований на той же контрольной выборке. Оба способа имеют практически одинаковые диагностические эффективности, но биоимпедансные исследования превосходят рентгенологические по специфичности и несколько уступают по чувствительности.*

Заключение. *В результате проведенного исследования получены принципиально новые результаты, позволяющие создать мониторинговые интеллектуальные системы поддержки принятия решений по диагностике инфекционных заболеваний. Создан метод биоимпедансного анализа, основанный на многочастотной биоимпедансометрии, позволяющий осуществлять декомпозицию импеданса биоматериала на структурные элементы. Предложена структурная схема устройства биоимпедансного анализа.*

Ключевые слова: *инфекционные заболевания; модель биоимпеданса; многочастотное зондирование; обучаемый классификатор; итерационный алгоритм; обучающая выборка.*

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

© Мирошников А. В., Шаталова О. В., Стадниченко Н. С., Шульга Л. В., 2020

Финансирование: *Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90063.*

Для цитирования: Классификации биологических объектов на основе многомерного биоимпедансного анализа / А. В. Мирошников, О. В. Шаталова, Н. С. Стадниченко, Л. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 29–49.

Поступила в редакцию 13.07.2020 *Подписана в печать 07.08.2020* *Опубликована 30.11.2020*

Classifications of Biological Objects Based on Multi-Dimensional Bioimpedance Analysis

Andrey V. Miroshnikov[1], Olga V. Shatalova[1] ✉, Nikita S. Stadnichenko[1], Leonid V. Shulga[1]

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

✉ e-mail: yulia.orlova@gmail.com

Abstract

Purpose of research. *In modern Russian healthcare, the task of long-term monitoring of a person's condition is almost always associated with either hospitalization or the rental of expensive monitoring systems. Therefore, the aim of the study is to develop diagnostic methods based on the hybrid use of multifrequency sensing of biomaterials, which make it possible to create monitoring intelligent decision support systems for the diagnosis of infectious diseases.*

Methods. *The risk classifiers of infectious diseases are based on the proposed method of bioimpedance analysis and performed on trained neural networks. The method for obtaining descriptors is based on multifrequency sensing of biomaterial. Cole's plots were plotted based on the results of the multifrequency sounding. Using iterative algorithms and these plots, Voigt models of biomaterial impedance were obtained. The parameters of these models are used as descriptors for the trained classifiers.*

Results. *As an example, a model of a classifier of patients with pneumonia with a clearly diagnosed and a group of volunteers without pulmonary pathologies was built. Control samples are formed from the obtained training sample by the rolling exam method. The indicators of the quality of diagnostics of the proposed method were compared, as with the prototype, with the indicators of the quality of X-ray studies on the same control sample. Both methods have practically the same diagnostic efficiency, but bioimpedance studies are superior to radiological studies in specificity and are somewhat inferior in sensitivity.*

Conclusion. *As a result of the study, fundamentally new results have been obtained that allow the creation of monitoring intelligent decision support systems for the diagnosis of infectious diseases. A bioimpedance analysis method has been developed based on multifrequency bioimpedance measurement, which allows decomposition of biomaterial impedance into structural elements. A block diagram of a bioimpedance analysis device is proposed.*

Keywords: *infectious diseases; bioimpedance model; multifrequency sensing; trainable classifier; iterative algorithm; training sample.*

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

Funding: *The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90063.*

For citation: Miroshnikov A. V., Shatalova O. V., Stadnichenko N. S., Shulga L. V. Classifications of Biological Objects Based on Multi-Dimensional Bioimpedance Analysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(3/4): 29–49. (In Russ.)

Received 13.07.2020 *Accepted 07.08.2020* *Published 30.11.2020*

***

Введение

Инфекционные заболевания, как и большинство других заболеваний, носят системный характер. Для ее диагностики, в частности ранней диагностики, требуется поиск новых маркеров и создание новых интеллектуальных технологий [1]. Высокие показатели заболеваемости и смертности от инфекционных заболеваний обусловлены несовершенством первичной и вторичной профилактики, а также несвоевременной диагностикой и лечением, что обусловлено отсутствием быстродействующих, безопасных, неинвазивных, многоразовых и дешевых тестирующих систем. В правильной диагностике, выборе тактики лечения и установления прогноза инфекционных заболеваний основная роль принадлежит инструментальным и лабораторным методам исследования. Наряду с широким использованием общепринятых тестов инструментальных и лабораторных исследований все больше внедряются в клиническую практику новые диагностические методики с помощью современного высокотехнологичного оборудования и вычислительной техники.

Однако применение методик инструментальных и лабораторных исследований отнимает значительное время и сопряжено с воздействием вредных факторов на организм, что не позволяет их использовать с высокой периодичностью и сильно затрудняет исследование патологического процесса в динамике. Это обстоятельство заставляет искать новые методы, ориентированные на неинвазивные исследования состояния организма человека, которые являются незаменимыми при скрининговых исследованиях. К скрининговым исследованиям выдвигаются требования достаточной пропускной способности в сочетании с высокой достоверностью выявления значимых отклонений. Это обусловлено внедрением в практику целого ряда инновационных диагностических технологий. Однако точность выявления риска инфекционных заболеваний посредством этих методов не удовлетворяет требованиям современной медицины.

Наряду с широким использованием в диагностике инфекционных заболеваний общепринятых тестов инструментальных и лабораторных исследований все больше внедряются в клиническую практику новые диагностические методики с помощью современного высокотехнологичного оборудования и вычислительной техники. Это обусловлено тем, что применение современных ме-

тодик инструментальных и лабораторных исследований отнимает значительное время и сопряжено с воздействием вредных факторов на организм (как на пациента, так и на медицинский персонал), что не позволяет их использовать с высокой периодичностью и сильно затрудняет исследование патологического процесса в динамике.

В области исследования неинвазивных методов диагностики инфекционных заболеваний актуальным является развитие методов диагностики, основанных на гибридном использовании многочастотного зондирования и контроля анизотропии электропроводности биоматериалов (основные идеи, положенные в основу диагностики онкологических и инфекционных заболеваний, изложены в [2]). Приборы, реализующие вышеизложенный подход, выполняются в виде мобильного блока, связанного с ЭВМ по радиоканалу. Предполагается, что непосредственно сам мобильный блок питается от автономного гальванического источника питания, а ввод данных в ЭВМ осуществляется через радиоканал (bluetooth). Поэтому, кроме программного обеспечения, обеспечивающего сбор данных по свойствам электропроводности биообъекта, необходимо программное обеспечение, обеспечивающее передачу данных в ЭВМ и формирование файлов данных, пригодных для обработки программным обеспечением, предназначенным для решения диагностических задач.

Устройства многочастотного зондирования биоматериалов для получения информации об их функциональном состоянии известны как биоимпедансные анализаторы состава тела. Например, в известном способе определения показателя гематокрита осуществляют измерение электропроводности крови на основе биоимпедансных исследований посредством электродов, установленных на лодыжках и запястьях человека. Регистрируют связанную с электропроводностью крови переменную составляющую сопротивления тела человека на частотах 20 ... 40 кГц и 200 ... 300 кГц, а показатель гематокрита H определяют из выражения

$$H^3 + \left[0,4 \cdot \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 - 3\right] \cdot H^2 + \left[3 - 1,2 \cdot \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2\right] \cdot H + \left[\left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 - 1\right] = 0, \quad (1)$$

где R_1 – амплитуда переменной составляющей сопротивления тела человека на частоте 20 ... 40 кГц, Ом; R_2 – амплитуда переменной составляющей сопротивления тела человека на частоте 200...300 кГц, Ом [3].

При выводе формулы (1) использовано две простые и весьма приближенные математические модели, отражающие зависимость электропроводности крови от гематокрита на частотах 20 ... 40 кГц и зависимость электропроводности крови от гематокрита на частотах 200 ... 300 кГц, в которых в качестве параметров используются электропровод-

ности плазмы крови и цитоплазмы эритроцитов, а также вводится допущение, что электропроводность плазмы крови практически не зависит от частоты.

Анализ этих допущений и результаты экспериментальных исследований показали, что они вносят серьезную погрешность при измерении сопротивления биожидкостей. Поэтому была предложена более сложная модель импеданса биообъекта в виде пятизвенной структуры (рис. 1), в которой исследования состава биоматериала основаны на сегментарной трехчастотной биоимпедансометрии [4].

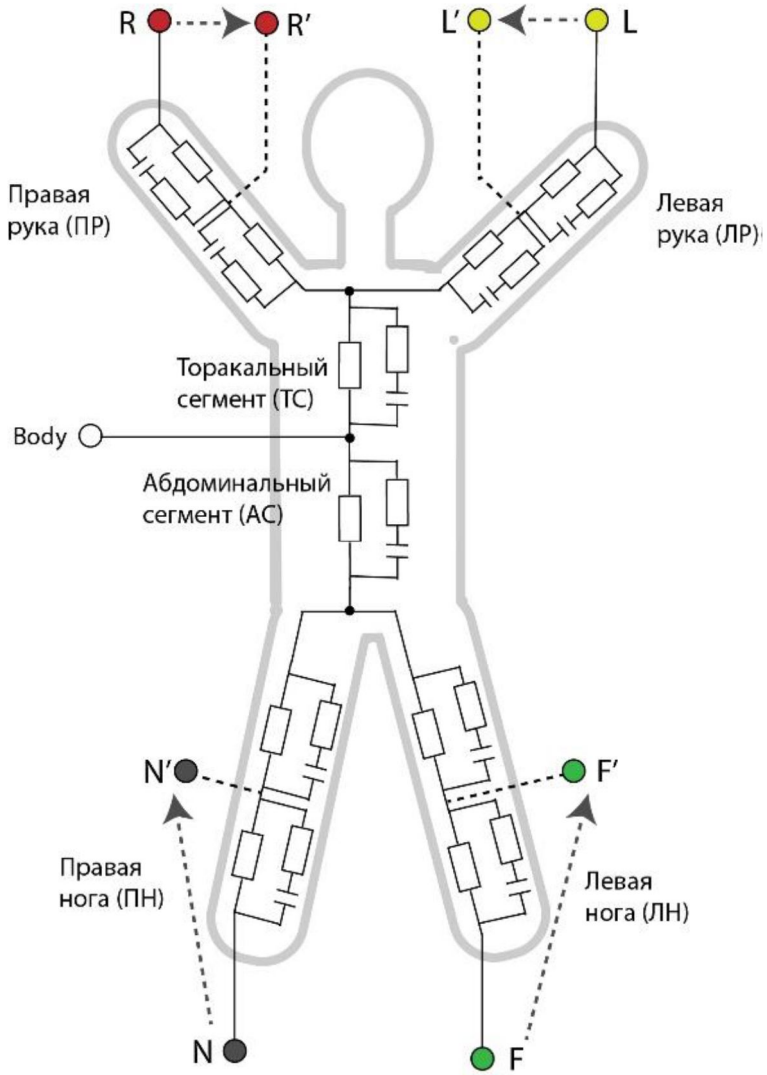

Рис. 1. Модель биоимпеданса с пятизвездочной структурой

Fig. 1. Bioimpedance model with a five-star structure

В этой модели биоимпеданса каждое звено состоит из двух последовательно соединенных пассивных двухполюсников, содержащих две параллельных ветви, одна из которых R_B соответствует вкладу внеклеточной жид-

кости в общее сопротивление биоткани, а вторая – емкостному сопротивлению клеточной мембраны x_C и внутриклеточной жидкости R_K. При этом параметры модели рассчитываются по результатам решения системы из трех уравнений.

$$\begin{cases} Z_1 = \dfrac{R_в\sqrt{R_к^2 + x_c^2}}{\sqrt{\left(R_в + R_к\right)^2 + x_c^2}}; \\ Z_2 = \dfrac{R_в\sqrt{R_к^2 + x_{c2}^2}}{\sqrt{\left(R_в + R_к\right)^2 + x_{c2}^2}} = \dfrac{R_в\sqrt{R_к^2 + \left(\dfrac{1}{k_2}x_c\right)^2}}{\sqrt{\left(R_в + R_к\right)^2 + \left(\dfrac{1}{k_2}x_c\right)^2}}; \\ Z_3 = \dfrac{R_в\sqrt{R_к^2 + x_{c3}^2}}{\sqrt{\left(R_в + R_к\right)^2 + x_{c3}^2}} = \dfrac{R_в\sqrt{R_к^2 + \left(\dfrac{1}{k_3}x_c\right)^2}}{\sqrt{\left(R_в + R_к\right)^2 + \left(\dfrac{1}{k_3}x_c\right)^2}}, \end{cases} \quad (2)$$

где Z_1, Z_2, Z_3 – измеренные импедансы на трех частотах; k – статистические коэффициенты.

Первые две частоты выбраны по следующим критериям: частота 28 кГц – близкая к оптимальной частота регистрации пульсовой волны в тканях сегментов туловища; частота 115 кГц – близкая к оптимальной частота регистрации реограммы мозга. Выбор третьей частоты зондирующего тока в общем случае может быть любым, но на практике она выбирается исходя из задачи достижения оптимизации погрешностей измерений согласно следующему сформированному критерию: погрешность вычисления $R_к$ должна быть меньше методической погрешности измерения объема жидкости биоимпедансными методами [4].

Недостатком данного подхода к классификации биоимпеданса является то, что для повышения точности оценки сопротивления внутриклеточной жидкости и косвенной оценки состава тела человека у разных групп обследуемых необходимо учитывать также индивидуальные особенности строения тела человека, и, как следствие, возникают проблемы с вычислениями коэффициентов k в (2).

Материалы и методы

За основу метода классификации биологических объектов взят метод, основанный на биоимпедансном анализе,

в котором для классификации сегмента биообъекта строится его модель в виде пассивного двухполюсника, накладываются электроды на выделенный сегмент биоматериала и осуществляется многочастотное зондирование на стольких частотах, сколько требуется для определения параметров модели пассивного двухполюсника. Классификация биообъекта осуществляется по полученным параметрам двухполюсника [5; 6; 7; 8; 9; 10]. В предлагаемом методе в качестве электродов используется матрица N электродов, электроды в которой с помощью мультиплексоров последовательно попарно коммутируются таким образом, чтобы получить $N/2$ электродных пар, каждая из которых соответствует $N/2$ направлениям электрического поля в биоматериале. Для каждого направления электрического поля строится модель сегмента биоматериала, соответствующая этому направлению. В качестве модели сегмента биоматериала используется рекурсивная модель Войта [11]. Для каждой из моделей Войта строится график Коула биоматериала под соответствующими электродами в диапазоне частот от $\Omega_{\min}$ до $\Omega_{\max}$ и выполняется рекурсивная процедура решения систем нелинейных уравнений по определению параметров модели, начиная от первого звена модели Войта и последовательно, наращивая звенья в модели Войта до тех пор, пока функционал ошибки аппроксимации графика Коула для соответствующей модели Войта не достигнет допустимого значения. В каждой модели Войта осуществляется преобразование множества $\{C_i, R_i\}_j$ в множество $\{\omega_i^*\}_j$, где i – номер звена в j-ой модели Войта, $j = \overline{1, N/2}$ – номер модели Войта для j-го сочетания электродов, $\omega_i^* = 1/(C_i R_i)$. Используя множество $\{\omega_i^*\}_j$ как дескрипторы, классифицируется биологический объект посредством обучаемого классификатора, построенного по иерархическому принципу.

Для реализации предложенного метода и моделей используется устройство для биоимпедансных исследований (рис. 2).

Процесс классификации биообъекта начинается с формирования графиков Коула для всех попарных сочетаний матрицы электродов 7. Реальная и мнимая составляющие биоимпеданса на токовом резисторе 8 рассчитываются как проекции вектора комплексного биоимпеданса на соответствующие оси. Токовый резистор 8 подобран таким образом, чтобы на нем падало как можно меньшее напряжение.

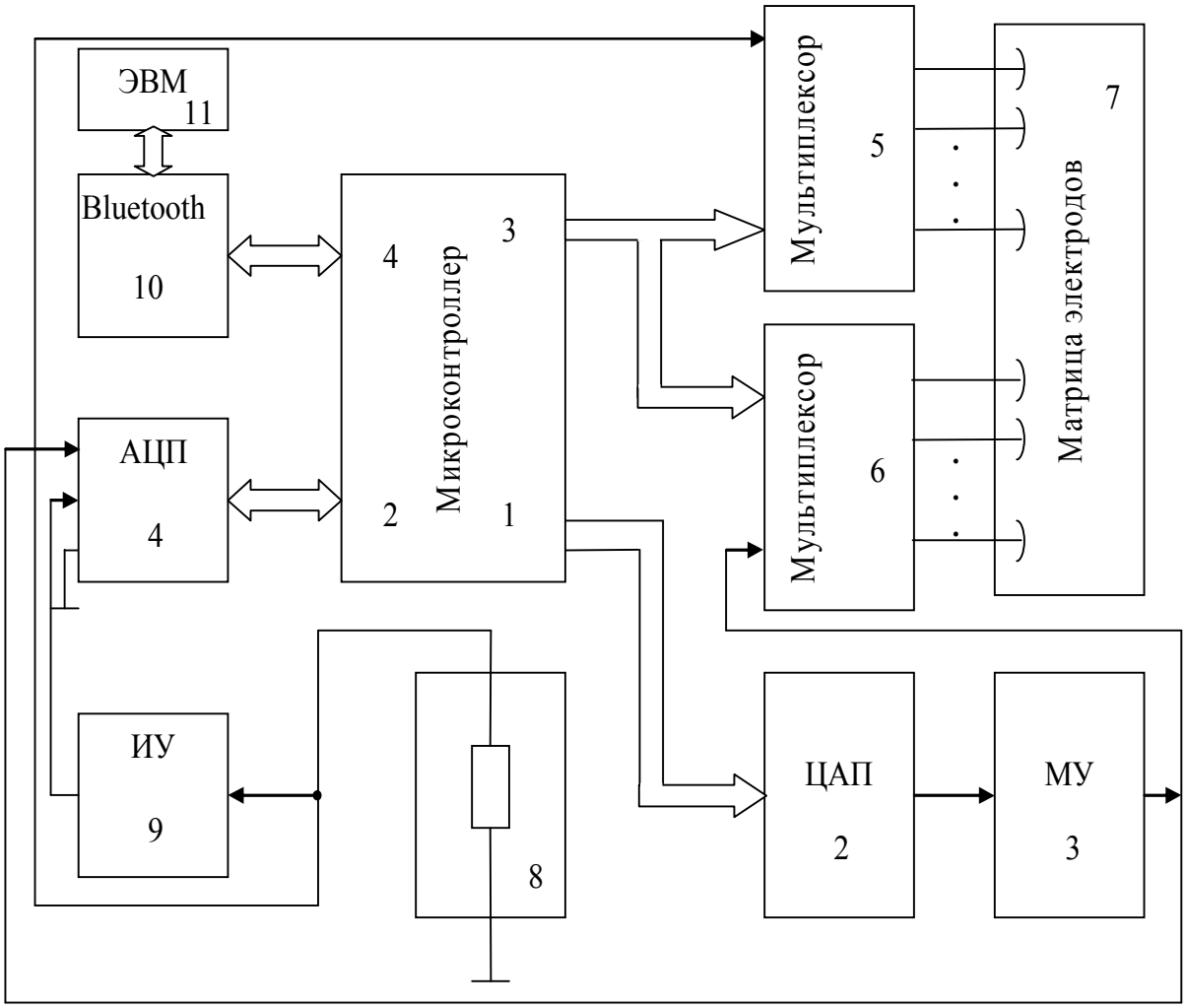

Рис. 2. Структурная схема устройства биоимпедансного анализа

Fig. 2. Block diagram of the bioimpedance analysis device

Ток в токовом резисторе 8 равен току в биообъекте:

$$\vec{I}_R = \vec{U}_R / R, \qquad (3)$$

где $\vec{U}_R$ – вектор падения напряжения на токовом резисторе 8; R – резистора 8.

Для расчета реальной и мнимой составляющих биоимпеденса необходимо определить угол φ или проекцию вектора $\vec{U}_R$ на вектор $\vec{U}_{БО}$ посредством синхронного детектирования, реализованного на программном уровне и выполняемого в микроконтроллере 1.

Учитывая, что комплексный вектор напряжения на биообъекте (БО) $\vec{U}_{БО} = U_{БО} \sin \omega t$ и комплексный вектор напряжения на токовом резисторе $\vec{U}_R = U_R \sin(\omega t + \varphi)$, получим

$$\vec{U}_{R_RE} = \frac{1}{2} U_R \cdot U_{БО} (\cos\varphi - \cos(2\omega t + \varphi)). \quad (4)$$

После низкочастотной фильтрации (4) получаем

$$\vec{U}_{R_RE} = \frac{1}{2} U_R \cdot U_{БО}(\cos\varphi). \quad (5)$$

Угол φ находим из (5), если известно U_{R_RE}. Величину U_{R_RE} получаем на выходе синхронного детектора. Цифровые отсчеты $U_{R_RE}[i]$, то есть отсчеты на выходе умножителя синхронного детектор, находим по отсчетам $U_{БО}[i]$ и $U_R[i]$, снимаемых с соответствующих АЦП 4 схемы рисунок 1, согласно правила синхронного детектирования:

$$\vec{U}_{R_RE}[i] = U_{БО}[i] \cdot U_R[i]. \quad (6)$$

Процедура (6) реализуется программно.

Напряжение U_{R_RE} определяется также программно путем низкочастотной фильтрации (6) по формуле

$$U_{R_RE} = \frac{U_{АЦП2}[i] \cdot U_{АЦП1}[i]}{N}, \quad (7)$$

где $U_{АЦП}[i]$ – отсчеты выходных напряжений АЦП в вольтах;

N – количество отсчетов на 10 периодах зондирующего тока.

Разность фаз определяем из (5).

Перейдем теперь к расчету модуля биоимпеданса.

Согласно закону Ома, модуль комплексного сопротивления выражается следующей формулой:

$$|Z| = \frac{U_{БО}}{I_R}. \quad (8)$$

где $U_{вых} = U_{БО}$ – амплитуда напряжения на выходе ЦАП.

Подставляя в (8) ток на резисторе R из (3), получим

$$|Z| = \frac{U_{БО}}{I_R} \cdot R. \quad (9)$$

Активная составляющая Z_{re} и реактивная составляющая Z_{im} определяются путем умножения модуля комплексного биоимпеданса $|Z|$ на косинус и синус разности фаз:

$$Z_{im} = \sin(\varphi) \cdot |Z|; \quad (10)$$

$$Z_{re} = \cos(\varphi) \cdot |Z|. \quad (11)$$

Алгоритм построения графика Коула для одного сочетания пар электродов представлен на рисунке 3.

В блоке 22 выбирается линейка исследуемых частот. На каждой из М выбранных частот в блоках 23...26 определяется импеданс биообъекта. На каждой частоте выполняется 10 измерений биоимпеданса (блоки 24...26) с последующим усреднением (блок 27). График Коула выводится в блоке 28.

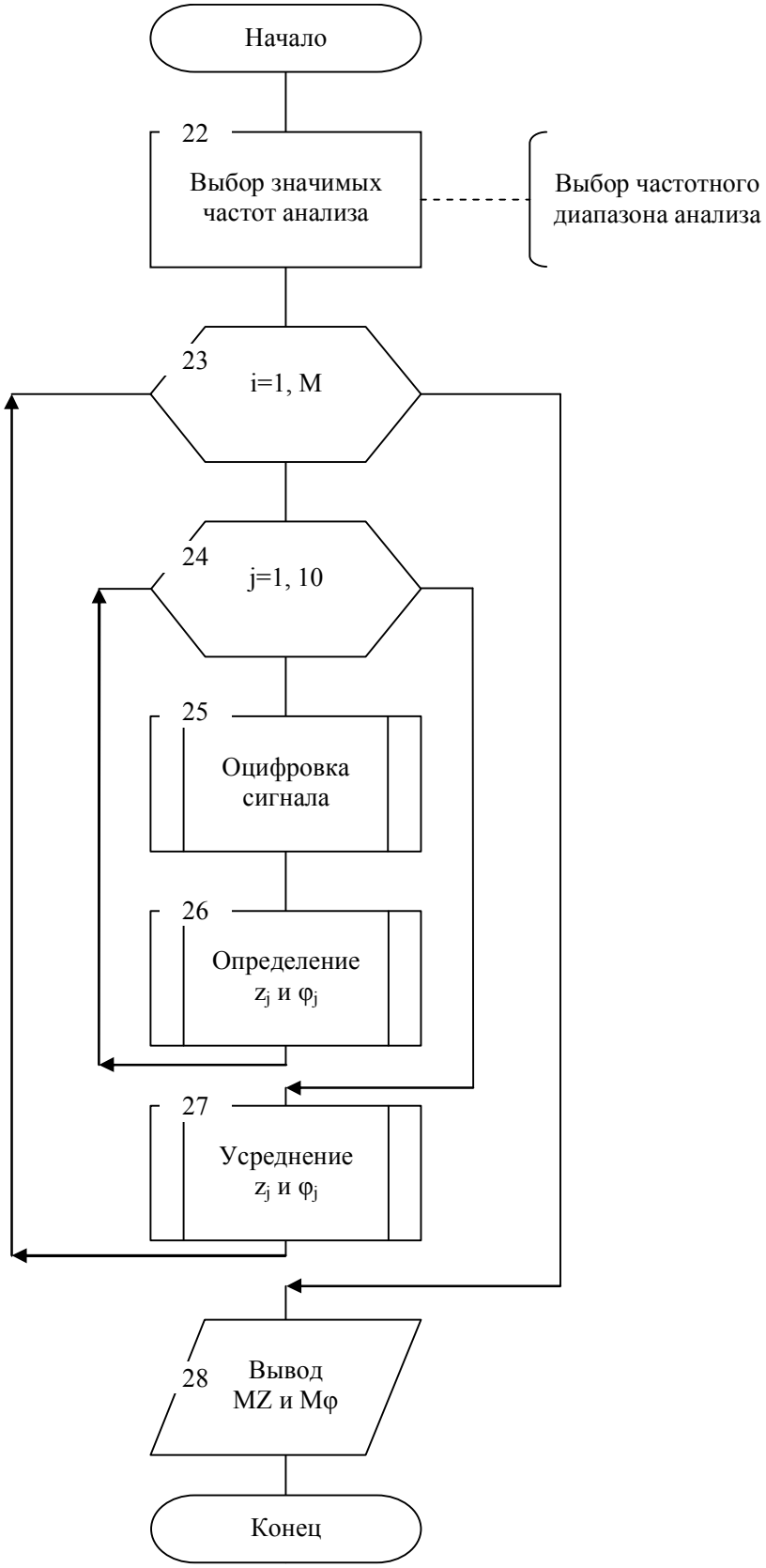

Рис. 3. Схема алгоритма построения графика Коула для одного сочетания пар электродов

Fig. 3. Scheme of the algorithm for constructing a Cole graph for one combination of electrode pairs

После получения графиков Коула для всех направлений зондирования приступаем к построению моделей Войта для каждого из этих направлений. Структура этой модели (рис. 4) состоит из последовательно связанных звеньев, каждое из которых моделирует конечную проводимость с соответствующей постоянной времени. Эта модель находит основное применение при описании проводимости (импеданса) в объеме негомогенных средах, т. е. когда каждому элементарному, локальному объему присущи определенная проводимость и собственная постоянная времени. Модель состоит из последовательно соединенных звеньев параллельно соединенных конденсатора и емкости. Импеданс модели (одна точка на графике Коула при частоте ω) определяется согласно формуле

$$Z_{VOIT}(\omega) = \sum_{l=1}^{L}\left(R_l^{-1} + j\omega C_l\right)^{-1}. \quad (12)$$

Для получения модели Войта используется алгоритм, схема которого представлена на рисунке 5.

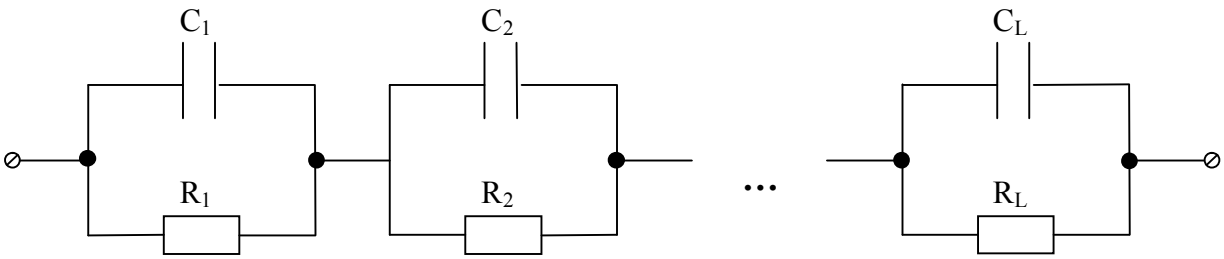

Рис. 4. Структура модели Войта

Fig. 4. The structure of the Voight model

Исходными данными для алгоритма являются графики Коула, полученные при реализации алгоритма (см. рис. 3). Так как алгоритм (рис. 5) является итерационным, то на его входе необходимо задать оптимизируемый функционал (его допустимое значение $\varepsilon_{доп}$) и предельное число итераций L (блок 29). В блоке 31 решается система из ℓ нелинейных уравнений. Значение ℓ инкрементируется на единицу от итерации к итерации. В первой итерации используются только две частоты из L имеющихся.

Первую точку на графике Коула можно выбрать в центре частотного диапазона. При выборе двух точек на графике Коула (модель Войта состоит из двух звеньев) диапазон $\Omega_{max} - \Omega_{min}$ делим пополам и в качестве начальных частот выбираем медианы полученных поддиапазонов. Например, при двадцати частотах на отрезке $\Omega_{max} - \Omega_{min}$ можем выделить девятнадцать интервалов в этом частотном диапазоне и получить двадцатизвенную модель Войта. При необходимости частоты могут быть скорректированы в интерактивном режиме в виде вариационного ряда, упорядоченного по релевантности частот.

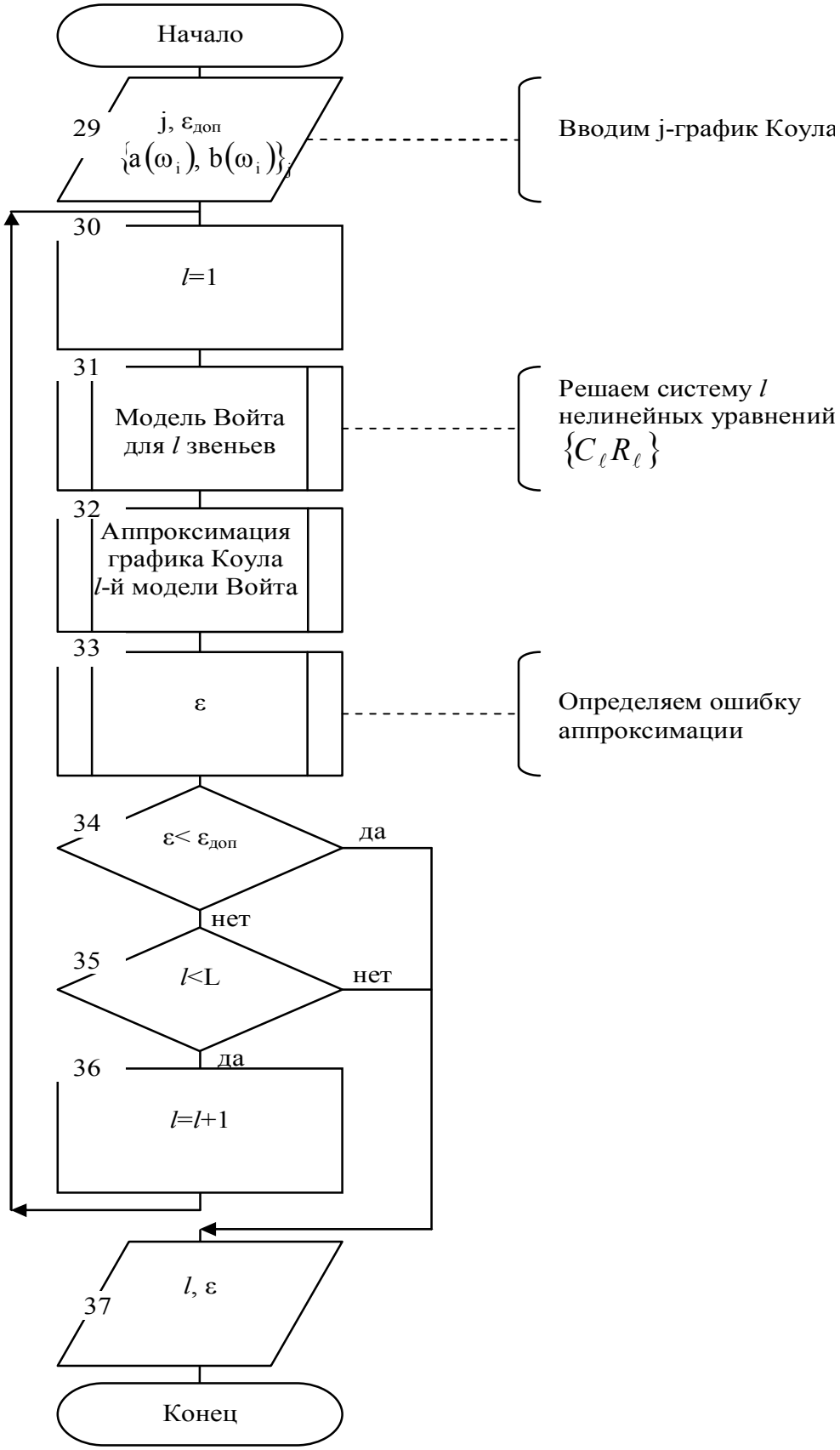

Рис. 5. Схема алгоритма построения модели Войта

Fig. 5. Diagram of the algorithm for constructing the Voight model

Результаты и их обсуждение

Модель Войта строится посредством решения системы нелинейных уравнений, полученных на основе графика Коула. Например, модель Войта для одного звена:

$$\left.\begin{aligned} a(\omega) &= \frac{R_1}{1+\omega^2 C_1^2 R_1^2}; \\ b(\omega) &= \frac{-\omega C_1 R_1^2}{1+\omega^2 C_1^2 R_1^2}, \end{aligned}\right\} \quad (13)$$

где $a(\omega)$ и $b(\omega)$ – координаты точки на графике Коула при $\omega = \text{const}$. Определяем C_1 и R_1 при $\omega = \text{const}$.

Вычисляем в блоке 31 теоретическую амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) согласно уравнению (12), при вычисленных из системы уравнений (13) C_1 и R_1 и сравниваем ее с экспериментальной (графиком Коула) в блоке 32. Ошибка аппроксимации ε (блок 33) определяется, например, по евклидову расстоянию и сравнивается с допустимой ошибкой $\varepsilon_{доп}$ (блок 34).

Если ошибка меньше допустимой, то итерационный процесс построения модели заканчивается в блоке 34. В противном случае к модели добавляется еще одно звено (блок 36) и модель Войта строится заново, т. е.решается новая система нелинейных уравнений с добавлением очередной частоты – двух значений параметров импеданса на очередной частоте графика Коула. Перед инкриминированием параметра ℓ осуществляется проверка на выход его за предельное значение (блок 35). При выходе этого параметра за предельное значение параметры модели Войта не переопределяются, а выводятся в качестве пространства информативных признаков.

Модель Войта для двухзвенной модели использует две точки на графике Коула и имеет вид

$$\left.\begin{aligned} a_1(\omega_1) &= \frac{R_1}{1+\omega_1^2 C_1^2 R_1^2} + \frac{R_2}{1+\omega_1^2 C_2^2 R_2^2}; \\ a_2(\omega_2) &= \frac{R_1}{1+\omega_2^2 C_1^2 R_1^2} + \frac{R_2}{1+\omega_2^2 C_2^2 R_2^2}; \\ b_1(\omega_1) &= \frac{-\omega_1 C_1 R_1^2}{1+\omega_1^2 C_1^2 R_1^2} + \frac{-\omega_1 C_2 R_2^2}{1+\omega_1^2 C_2^2 R_2^2}; \\ b_1(\omega_1) &= \frac{-\omega_2 C_1 R_1^2}{1+\omega_2^2 C_1^2 R_1^2} + \frac{-\omega_2 C_2 R_2^2}{1+\omega_2^2 C_2^2 R_2^2}. \end{aligned}\right\} \quad (14)$$

После решения уравнения (14) получаем новые параметры двухполюсников в модели Войта и повторяем процедуры блоков 31, 32 и 33. Если точность аппроксимации неудовлетворительная, то добавляем в систему уравнений (14) еще два уравнения, решаем ее и строим модель (12) заново.

Модель Войта строится для каждого графика Коула, в результате чего получаем множество $\{C_i R_i\}_j$, где C_i и R_i – параметры *i*-го звена *j*-й модели Войта, $i=\overline{1,\ell}$; $j=\overline{1,N/2}$. После построения моделей Войта для всех *N/2* направлений (геометрических) зондирования посредством алгоритма рисунок 5 преобразуем пространство информативных признаков $\{C_i R_i\}_j$ в пространство квазирезонансных частот $\{\omega_i^*\}_j$, где $\omega_i^* = 1/(C_i R_i)$.

Таким образом, построили матричное пространство информативных признаков с размерностью матрицы $\ell \times (N/2)$. Для построения классификатора по этому пространству информативных признаков используем обучаемые нейронные сети с иерархической структурой [12; 13; 14; 15; 16]. На первом иерархическом уровне имеем $N/2$ нейронных сетей, каждая из которых имеет один выход и ℓ входов. Выход нейронной сети первого иерархического уровня показывает уверенность в принадлежности биоматериала к классу функционального состояния, на который была обучена нейронная сеть. Нейронные сети первого иерархического уровня обучаются по одним и тем же обучающим выборкам. Выходы нейронных сетей лежат в диапазоне от нуля до единицы. При это классификация ведется по двум классам – «класс интереса» и класс «все остальное» [17; 18; 19; 20]. На втором иерархическом уровне имеется только одна нейронная сеть с одним выходом и числом входов, равным числу нейронных сетей на первом иерархическом уровне.

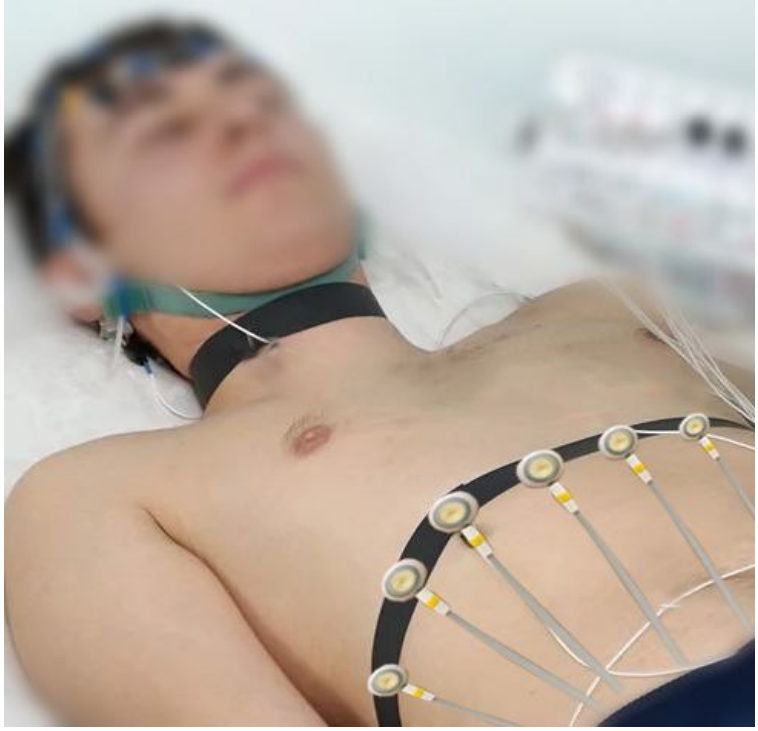

Рис. 6. Иллюстрация процесса классификации биоматериала в эксперименте in vivo

Fig. 6. Illustration of the process of classification of biomaterial in an experiment in vivo

В качестве примера была взята группа пациентов, больных пневмонией с четко поставленным диагнозом (рентгенография, рентгеновская томография, данные лабораторного анализа), и группа волонтеров без легочных патологий. Диагнозы кодируются символами «0» и «1». Из полученной обучающей выборки методом скользящего экзамена формируются контрольные выборки. Для получения данных биоимпедансного анализа на грудную клетку пациента

надевают электродный пояс и определяют графики Коула, соответствующие определенному сочетанию электродов. Процесс их получения иллюстрирует рисунок 6. Графики Коула определяются согласно схеме алгоритма (см. рис. 3).

Показатели качества диагностики по классам «пневмония – нет пневмонии» для одной из контрольных выборок представлены в таблице.

Таблица. Показатели качества прогнозирования на контрольной выборке

Table. Indicators of the quality of forecasting on the control sample

Обследуемые	Биоимпедансные исследования, %			Рентгенологические исследования, %		
	ДЧ	ДС	ДЭ	ДЧ	ДС	ДЭ
$n^1_{\omega 1} = 60$	75	83	79	87	66	77
$n^2_{\omega 1} = 60$	83	75		66	87	

Показатели качества диагностики предлагаемого способа сравнивались, как с прототипом, с показателями качества рентгеновских исследований на той же контрольной выборке.

Выводы

Анализируя таблицу, приходим к выводу, что на данной контрольной выборке оба способа имеют практически одинаковые диагностические эффективности, но биоимпедансные исследования превосходят рентгенологические по специфичности и несколько уступают по чувствительности, что позволяет рекомендовать их в клиническую практику.

Таким образом, для классификации биоматериала на наличие инфекционных заболеваний используются дескрипторы, которые определяются посредством представления модели биоматериала в виде многозвенного двухполюсника, параметры звеньев которого определяются на основе многочастного зондирования. Полученная многомерная модель дескрипторов используется для обучения нейронных сетей, выполняющих функции классификатора биоматериала. В результате проведения исследования получены результаты, позволяющие создать интеллектуальные системы поддержки принятия решений по прогнозированию и диагностике инфекционных заболеваний. Возможность многочастотного зондирования позволит построить алгоритмы дифференциального контроля импеданса ткани и импеданса жидкости, что позволит получить новые решающие правила для диагностики патологических состояний организма (сердечно-сосудистые, инфекционные и онкологические заболевания).

Список литературы

1. Модель формирования функциональных систем с учетом менеджмента адаптационного потенциала / С. А. Филист, А. Н. Шуткин, Е. С. Шкатова, С. В. Дегтярев, Д. Ю. Савинов // Биотехносфера. 2018. № 1(55). С. 32–37.

2. Пат. 2504328 Российская Федерация, МПК А 61 В 5/053. Устройство для контроля анизотропии электрической проводимости биотканей / Р. А. Томакова, С. А. Филист, А. А. Кузьмин, М. Н. Кузьмина, В. А. Алексенко, И. И. Волков; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ). № 2012128471/14; заявл. 06.07. 12; опубл. 20.01. 14, Бюл. № 2. 2 с.

3. Пат. 2209430 Российская Федерация, МПК G 01 N 33/48, G 01 N 27/00. Способ определения показателя гематокрита / Я. С. Пеккер, А. Л. Тестов; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. № 2001125837/14; заявл. 21.09.01; опубл. 27.07.03, Бюл. № 21. 4 с.

4. Метод оценки объемов внеклеточной и внутриклеточной жидкости тела человека с помощью трехчастотной биоимпедансометрии / Н. Ю. Волков, В. В. Илларионов, М. Н. Соловьев, З. М. Юлдашев // Биотехносфера. 2018. № 1. С. 19–22.

5. Филист С. А., Алексенко В. А., Кабус Кассим. Гибридные информационные технологии по экспресс-диагностике инфекционных заболеваний на основе многочастотного анализа пассивных свойств биотканей // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск «Медицинские информационные системы». 2010. № 8(109). С. 12–17.

6. Попечителев Е. П., Филист С. А. Способы и модели идентификации биоматериалов на основе анализа многочастотного импеданса // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника. Медицинское приборостроение. 2011. № 1. С. 74–80.

7. Shatalova O. V., Burmaka A. A., Korovin E. N. Impedance models in anomalous electrical conduction zones forming by in-vivo experiments for intelligent systems of socially important diseases diagnostic // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, 2018. P. 1–4.

8. Шаталова О. В. Итерационная многопараметрическая модель биоимпеданса в экспериментах in vivo // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 1 (30). С. 26–38.

9. Параметрические модели биоимпеданса для идентификации функционального состояния живой системы / К. Д. А. Кассим, И. А. Ключиков, О. В. Шаталова, З. Д. Яа // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 4. С. 50–56.

10. Филист С. А., Кузьмин А. А., Кузьмина М. Н. Биотехническая система для контроля импеданса биоматериалов в экспериментах invivo // Биомедицинская радиоэлектроника. 2014. № 9. С. 38–42.

11. Буянова Е. С., Емельянова Ю. В. Импедансная спектроскопия электролитических материалов: учебное пособие. Екатеринбург: УрГУ, 2008. 70 с.

12. Использование гибридных нейросетевых моделей для многоагентных систем классификации в гетерогенном пространстве информативных признаков / С. Е. Суржикова, С. А. Филист, В. В. Жилин, А. Г. Курочкин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2015. № 3. С. 85–95.

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

14. Использование гибридных нейросетевых моделей для многоагентных систем классификации в гетерогенном пространстве информативных признаков / С. А. Филист, А. Г. Курочкин, В. В. Жилин [и др.] // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. Научно-технический журнал. 2015. № 3 (31). С. 85–95.

15. Филист С. А., Шаталова О. В., Ефремов М. А. Гибридная нейронная сеть с макрослоями для медицинских приложений // Нейрокомпьютеры. Разработка и применение. 2014. № 6. С. 35–39.

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

17. Biotechnical monitoring system for determining persons health state in polluted environment using hybrid decisive rules / R. T. Al-Kasasbeh, N. Korenevskiy, S. Filist, O. V. Shatalova, M. S. Alshamasin, A. A. Shaqadan // International Journal of Modelling, Identification and Control. 2019. Vol. 32, N 1. P. 10–22.

18. Intelligent medical decision support system based on internet-technology / R. A. Tomakova, S. A. Filist, A. I. Pykhtin, A. N. Shutkin // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2016. N 2-1. P. 263–270.

19. Hybrid intelligent models for chest x-ray image segmentation / S. A. Filist, R. A. Tomakova, S. V. Degtyarev, A. F. Rybochkin // Biomedical Engineering. 2018. Vol. 51, N 5. P. 358–363.

20. The role of hybrid classifiers in problems of chest roentgenogram classification / R. Tomakova, S. Filist, R. Veynberg, A. Brezhnev, A. Brezhneva // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 902. P. 293–303.

References

1. Filist S. A., Shutkin A. N., Shkatova E. S., Degtyarev S. V., Savinov D. Y. Model' formirovaniya funkcional'nyh sistem s uchetom menedzhmenta adaptacionnogo potenciala [Model of the formation of functional systems taking into account the management of adaptive potential]. *Biotekhnosfera = Biotechnosphere*, 2018, no. 1(55), pp. 32–37. (In Russ.)

2. Tomakova R. A., Filist S. A., Kuz'min A. A., Kuz'mina M. N., Aleksenko V. A., Volkov I. I. Ustrojstvo dlya kontrolya anizotropii elektricheskoj provodimosti biotkanej [Device for controlling anisotropy of electric conductivity of biotissues]. Patent RF, no. 2504328, 2014. (In Russ.)

3. Pekker Ya. S., Testov A. L. Sposob opredeleniya pokazatelya gematokrita [Method for determining hematocrit value]. Patent RF, no. 2209430, 2003. (In Russ.)

4. Volkov N. Yu., Illarionov V. V., Solov'ev M. N., Yuldashev Z. M. Metod otsenki ob"emov vnekletochnoy i vnutrikletochnoy zhidkosti tela cheloveka s pomoshch'yu trekhchastotnoy bioimpedansometrii [Method for estimating the volume of extracellular and intracellular fluid of the human body using three-frequency bioimpedance measurement]. *Biotekhnosfera = Biotechnosphere*, 2018, no. 1, pp. 19–22. (In Russ.)

5. Filist S. A., Aleksenko V.A., Kabus Kassim. Gibridnye informacionnye tekhnologii po ekspress-diagnostike infekcionnyh zabolevanij na osnove mnogochastotnogo analiza passivnyh svojstv biotkanej [Hybrid information technologies for express diagnostics of infectious diseases based on multifrequency analysis of passive properties of biological tissues]. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki. Tematicheskij vypusk «Medicinskie informacionnye sistemy» = Izvestia SFU. Technical science. Thematic issue "Medical Information Systems"*, 2010, no. 8(109), pp.12–17. (In Russ.)

6. Popechitelev E. P., Filist S. A. Sposoby i modeli identifikacii biomaterialov na osnove analiza mnogochastotnogo impedansa [Methods and models for identification of biomaterials based on multifrequency impedance analysis]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2011, no. 1, pp. 74–80. (In Russ.)

7. Shatalova Olga V., Burmaka Alexandr A., Korovin Evgeny N. Impedance models in anomalous electrical conduction zones forming by in-vivo experiments for intelligent

systems of socially important diseases diagnostic. International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, 2018, pp. 1–4.

8. Shatalova O. V. Iteracionnaya mnogoparametricheskaya model' bioimpedansa v eksperimentah in vivo [Iterative multiparameter bioimpedance model in in vivo experiments]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, vol. 9, no. 1(30), pp. 26–38. (In Russ.)

9. Kassim K. D. A., Klyuchikov I. A., Shatalova O. V., Ya Z. D. Parametricheskie modeli bioimpedansa dlya identifikacii funkcional'nogo sostoyaniya zhivoj sistemy [Parametric bioimpedance models for identifying the functional state of a living system]. *Biomedicinskaya radioelektronika = Biomedicine Radioengineering*, 2012, no. 4, pp. 50–56. (In Russ.)

10. Filist S. A., Kuzmin A. A., Kuzmina M. N. Biotekhnicheskaya sistema dlya kontrolya impedansa biomaterialov v eksperimentah invivo [Biotechnical system for controlling the impedance of biomaterials in in vivo experiments]. *Biomedicinskaya radioelektronika = Biomedicine radioengineering*, 2014, no. 9, pp. 38–42. (In Russ.)

11. Buyanova E. S., Emel'yanova Y. V. Impedansnaya spektroskopiya elektroliticheskih materialov [Impedance Spectroscopy of Electrolytic Materials Tutorial]. Ekaterinburg, UrGU Publ., 2008. 70 p. (In Russ.)

12. Surzhikova S. E., Filist S. A., Zhilin V. V., Kurochkin A. G. Ispol'zovanie gibridnyh nejrosetevyh modelej dlya mnogoagentnyh sistem klassifikacii v geterogennom prostranstve informativnyh priznakov [Using hybrid neural network models for multi-agent classification systems in a heterogeneous space of informative features]. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2015, no. 3, pp. 85–95. (In Russ.)

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

14. Filist S. A., Kurochkin A. G., Zhilin V. V., eds. Ispol'zovanie gibridnyh nejrosetevyh modelej dlya mnogoagentnyh sistem klassifikacii v geterogennom prostranstve informativnyh priznakov [Using hybrid neural network models for multi-agent classification systems in a heterogeneous space of informative features]. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii. Nauchno-tekhnicheskij zhurnal = Caspian Journal: Management and High Technologies. Scientific and Technical Journal*, 2015, no. 3 (31), pp. 85–95. (In Russ.)

15. Filist S. A., Shatalova O. V., Efremov M. A. Gibridnaya neyronnaya set' s makrosloyami dlya meditsinskih prilozheniy [Hybrid neural network with macro layers for medical applications]. *Neyrokomp'yutery: razrabotka, primenenie = Neurocomputers: Development, Application*, 2014, no. 6, pp. 35–69. (In Russ.)

16. Kiselev A. V., Petrova T. V., Degtyarev S. V., Rybochkin A. F., Filist S. A., Shatalova O. V., Mishustin V. N. Neyrosetevye moduli s virtual'nymi potokami dlya klassifikatsii i prognozirovaniya funktsional'nogo sostoyaniya slozhnyh system [Neural network modules with virtual flows for classifying and predicting the functional state of complex systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of southwest state university*, 2018, no. 4 (79), pp. 123–134. (In Russ.)

17. Al-Kasasbeh R. T., Korenevskiy N., Filist S., Shatalova O. V., Alshamasin M. S., Shaqadan A. A. Biotechnical monitoring system for determining persons health state in polluted environment using hybrid decisive rules. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 2019, vol. 32, no. 1, pp. 10–22.

18. Tomakova R. A., Filist S. A., Pykhtin A. I., Shutkin A. N. Intelligent medical decision support system based on internet-technology. International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 2016, no. 2-1, pp. 263–270.

19. Filist S. A., Tomakova R. A., Degtyarev S. V., Rybochkin A. F. Hybrid intelligent models for chest x-ray image segmentation. *Biomedical Engineering*, 2018, vol. 51, no. 5, pp. 358–363.

20. Tomakova R., Filist S., Veynberg R., Brezhnev A., Brezhneva A. The role of hybrid classifiers in problems of chest roentgenogram classification. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 902, pp. 293–303.

Информация об авторах / Information about the Authors

Мирошников Андрей Валерьевич, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: miron_22_91@mail.ru

Andrey V. Miroshnikov, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: miron_22_91@mail.ru

Шаталова Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: shatolg@mail.ru

Olga V. Shatalova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: shatolg@mail.ru

Стадниченко Никита Сергеевич, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: stadnikita@gmail.com

Шульга Леонид Васильевич, доктор медицинских наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация

Nikita S. Stadnichenko, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: stadnikita@gmail.com

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

Оригинальная статья / Original article

УДК 681.5.017

Моделирование системы управления режимами токарной обработки с учетом изменения температуры в зоне резания

В. Г. Рубанов[1], И. А. Рыбин[1], С. А. Сильченко[1], А. В. Рыбина[1] ✉

[1] Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова
ул. Костюкова 46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: anna.vasilevna@mail.ru

Резюме

Цель исследования. *Компьютерное моделирование процесса механической обработки деталей может быть полезно при прогнозировании изменения технологических параметров, а также в вопросах снижения временных и материальных затрат на различных этапах проектирования производства. Целью исследования являются разработка компьютерной модели системы управления режимами токарной обработки деталей с учетом изменения температуры в зоне резания.*

Методы. *Для решения поставленных задач применены основы теории систем автоматического управления, теории резания металлов, методы математического моделирования динамических систем.*

Результаты. *В результате разработана математическая модель в Simulink, позволяющая исследовать динамические характеристики процесса резания как объекта управления.*

Заключение. *Для достижения данной цели поставлены и решены следующие задачи: изучение и выбор необходимых математических зависимостей для описания процесса токарной обработки и встраивание их в модель системы управления резанием; разработка алгоритмического и программного обеспечения расчета сигналов в системе управления резанием. Полученная модель может быть полезна при научном анализе технологических процессов механической обработки и разработке систем управления с учетом изменения температуры в зоне резания.*

Ключевые слова: *токарная обработка; процесс резания; температура резания; компьтерная модель; система управления.*

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

Финансирование: *Исследование выполнено в рамках реализации Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В. Г. Шухова по гранту № А-59/20 от 15.01.2020 г.*

© Рубанов В. Г., Рыбин И. А., Сильченко С. А., Рыбина А. В., 2020

Для цитирования: Моделирование системы управления режимами токарной обработки с учетом изменения температуры в зоне резания / В. Г. Рубанов, И. А. Рыбин, С. А. Сильченко, А. В. Рыбина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 50–63.

Поступила в редакцию 15.07.2020 *Подписана в печать 18.08.2020* *Опубликована 30.11.2020*

Modeling of the Control System for Turning Modes with Regard to Temperature Changes in the Cutting Zone

Vasiliy G. Rubanov[1], Ilya A. Rybin[1], Sergei A. Silchenko[1], Anna V. Rybina[1] ✉

[1] Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov
46 Kostyukova str., Belgorod 308012, Russian Federation

✉ e-mail: anna.vasilevna@mail.ru

Abstract

***Purpose of the research**. Computer modeling of the process of machining parts can be useful in predicting changes in technological parameters, as well as in reducing time and material costs at various stages of production engineering.*
The purpose of this work is to develop a computer model for controlling the modes of turning parts, taking into account changes in temperature in the cutting zone.
***Methods.** To solve these problems, the basics of the theory of automatic control systems, the theory of metal cutting, and methods of mathematical modeling of dynamic systems are applied.*
***Results.** As a result, we developed a mathematical model in Simulink that allows us to study the dynamic characteristics of the cutting process as a control object.*
***Conclusion.** To achieve this goal, the following tasks were set and solved: study and select the necessary mathematical dependencies for describing the turning process and embed them in the model of the cutting control system; development of algorithmic and software for calculating signals in the cutting control system.The resulting model can be useful for scientific analysis of technological processes of mechanical processing and development of control systems taking into account temperature changes in the cutting zone.*

***Keywords:** turning; cutting process; cutting temperature; computer model; control system.*

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

***Funding:** The study was carried out within the framework of the Development Program of the reference university on the basis of V. G. Shukhov BSTU under grant no. A-59/20 dated 15.01.2020.*

For citation: Rubanov V. G., Rybin I. A., Silchenko S. A., Rybina A. V. Modeling of the Control System for Turning Modes with Regard to Temperature Changes in the Cutting Zone. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(3/4): 50–63. (In Russ.)

Received 15.07.2020 *Accepted 18.08.2020* *Published 30.11.2020*

***

Введение

Математическое моделирование с использованием современных программных средств, таких как Matlab, позволяет совершенствовать теоретические исследования и минимизировать затраты на этапе подготовки новых технологий производства. При моделировании могут быть выявлены недостатки алгоритмов управления и предложены способы повышения их качества. В данной работе рассмотрены вопросы моделирования токарной обработки деталей, при этом особое внимание уделено таким аспектам, как нагрузка на резец и тепловые процессы в зоне резания [1]. Известно большое количество работ [2; 3; 4; 5], связанных с вопросами разработки математических моделей процесса резания при токарной обработке. Выявленным недостатком в указанных работах является построение статических математических моделей процесса резания только на основе упрощенных формул без учета динамики всей системы в целом, что затрудняет использование этих моделей, например, для исследования алгоритмов управления. Динамические модели процесса токарной обработки, описанные например в [6; 7], могут быть расширены для учета влияния температуры при построении систем управления режимами резания. Подобный подход к построению модели системы управления токарной обработкой рассмотрен в [8], но при этом в динамике не учитывается изменение поперечной подачи. Таким образом, целью настоящей работы является разработка обобщенной модели системы управления токарной обработкой с учетом динамических процессов, происходящих в приводах главного вращения и подач станка, и изменения температуры резания. Такая модель может быть полезна при проверке работоспособности подходов к построению интеллектуальных алгоритмов управления механообработкой с учетом температуры в зоне резания, описанных, например в [9; 10; 11; 12; 13].

Материалы и методы

При построении компьютерной модели процесса резания использовались известные эмпирические зависимости [14]. Скорость резания при продольном точении рассчитывается по формуле

$$\nu = \frac{C_\nu}{T^m t^x s^y} K_\nu ,$$

где C_v – постоянная, зависящая от условий обработки; T – период стойкости режущего инструмента; t – глубина резания; s – подача на оборот; m, x, y – показатели степеней; K_v – общий поправочный коэффициент.

Для расчета составляющих силы резания использовано эмпирическое выражение:

$$P = 10 C_P t^x s^y \nu^n K_P ,$$

где C_P – постоянный коэффициент для составляющей силы резания; t – глубина резания; s – подача на оборот; v – скорость резания; x, y, n – показатели

степеней для составляющих силы резания; K_P – поправочный коэффициент.

На рисунке 1 представлена подсистема процесса резания в Matlab/Simulink.

На основании динамических зависимостей построены модели двигателей подач и главного вращения [15]:

$$\begin{cases} U = L\dfrac{di}{dt} + iR + E, \\ \mathrm{M} = \mathrm{M}_\mathrm{C} + J\dfrac{d\omega}{dt}, \end{cases}$$

где U – напряжение источника питания, подаваемое на якорь двигателя; L – индуктивность якоря; R – сопротивление якоря; i – ток якоря; E – ЭДС, наводимая в обмотке якоря; M – электромагнитный момент двигателя; M_C – момент сопротивления на валу двигателя; J – момент инерции, приведённый к валу двигателя; ω – скорость вращения якоря.

Динамическая модель механизма привода продольной подачи приведена на рисунке 2.

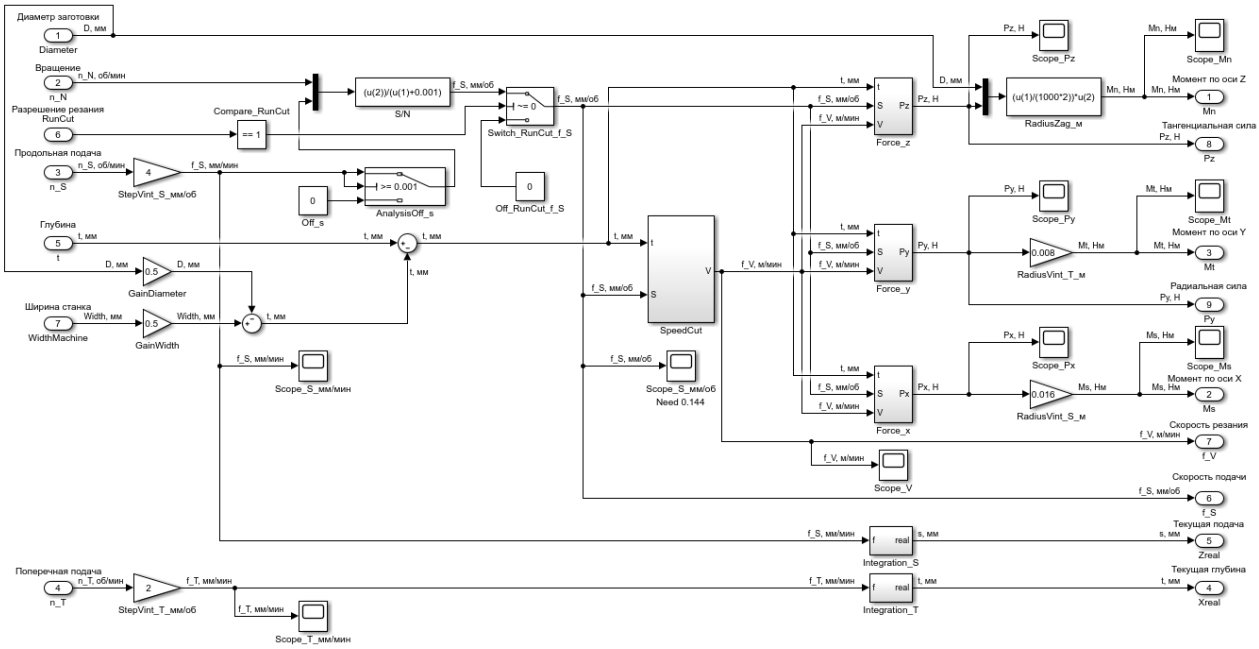

Рис. 1. Подсистема процесса резания в Matlab/Simulink

Fig. 1. Subsystem of cutting process in Matlab/Simulink

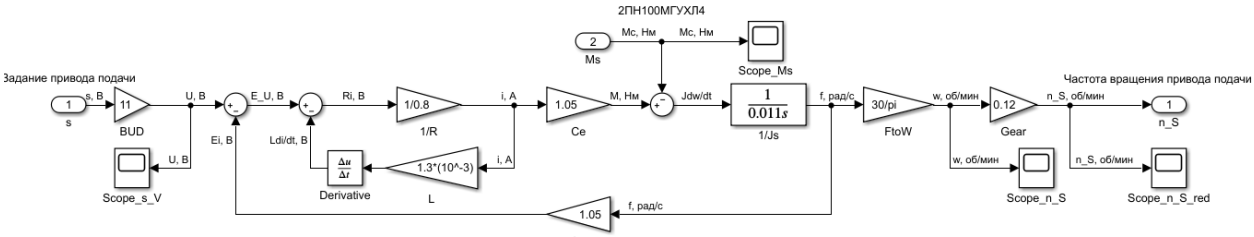

Рис. 2. Подсистема двигателя продольной подачи в Matlab/Simulink

Fig. 2. Longitudinal feed motor subsystem in Matlab / Simulink

В основе модели подсистемы расчета температуры в зоне резания использован алгоритм, описанный в [16], который построен на основании эмпирических зависимостей (рис. 3).

В подсистеме управления станком реализованы алгоритмы установочного перемещения и регулирования подачи для обеспечения требуемой шероховатости поверхности, зависящей от режимов резания и возникающей в процессе обработки температуры в зоне резания (рис. 4). Согласно алгоритмам управления, анализируются текущая температура резания, глубина резания, подача и положение инструмента в системе координат станка. Исходя из полученных данных формируется задание для электроприводов продольной и поперечной подач, главного вращения, логический сигнал разрешения начала процесса резания после установочного перемещения, время обработки детали для алгоритма расчёта значения температуры.

На основе подсистем резания, двигателей подач и главного вращения с редукторами, расчета температуры и управления построена обобщенная динамическая модель системы управления токарного станка в целом (рис. 5). Модель разработана в пакете Simulink, параметры станка, инструмента и детали заданы в инициализирующем m-файле, что позволит изменять начальные значения.

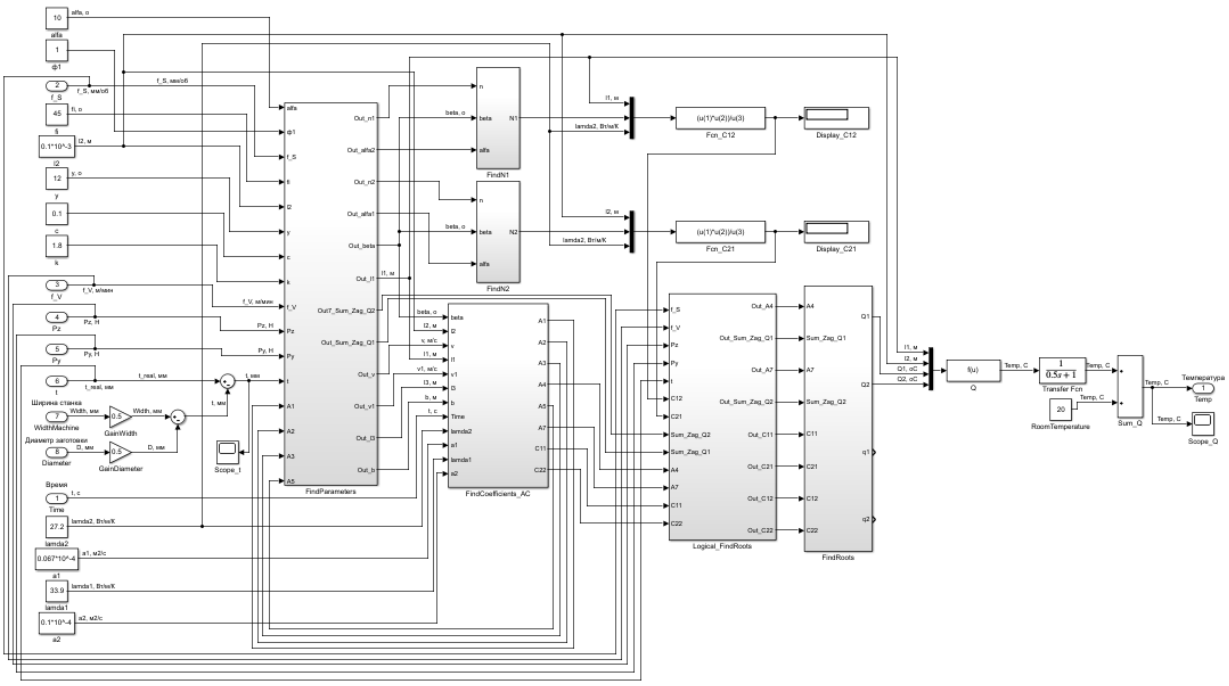

Рис. 3. Подсистема расчета температуры резания в Matlab/Simulink

Fig. 3. Cutting temperature calculation subsystem in Matlab/Simulink

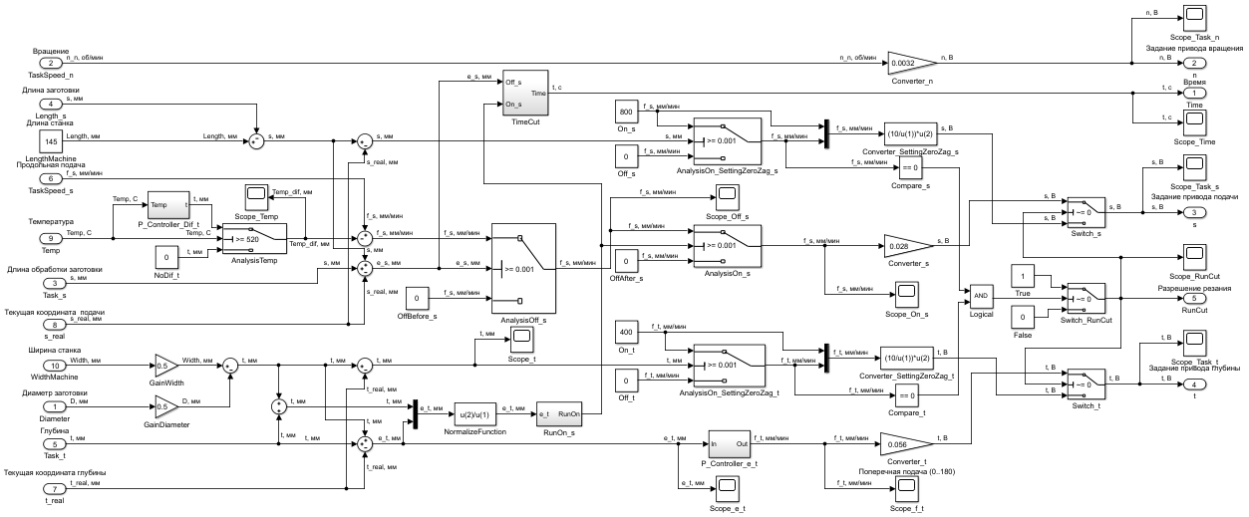

Рис. 4. Подсистема управления процессом резания в Matlab/Simulink

Fig. 4. The subsystem of control of cutting process in Matlab/Simulink

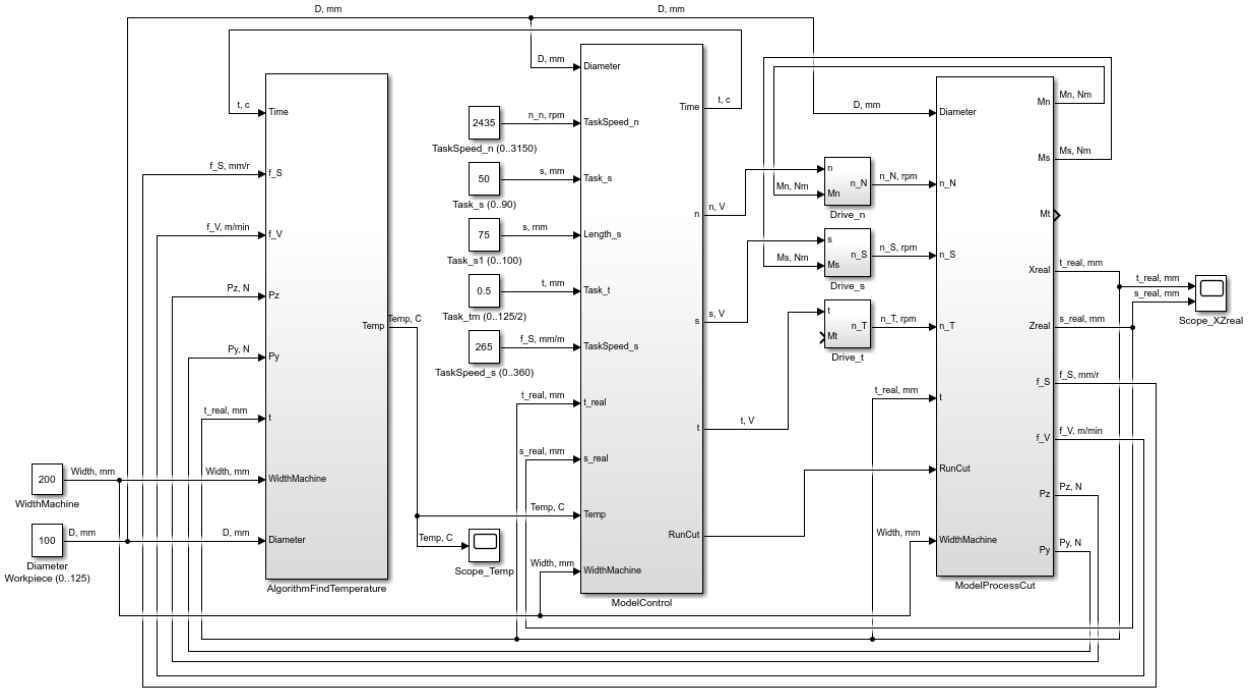

Рис. 5. Структурная схема системы управления резанием в Matlab/Simulink

Fig. 5. Block diagram of the cutting control system in Matlab / Simulink

Результаты и их обсуждение

Полученная обобщенная модель позволяет: исследовать процесс управления подведением резца токарного станка на заданную глубину резания и поддержания его в этом положении во время всего процесса продольного точения; проводить анализ алгоритмов управления резцом, обеспечивающих поддержание необходимых режимов резания; получать реальное текущее

положения резца станка по осям X и Z в системе координат токарного станка.

При демонстрации работоспособности модели были приняты следующие исходные данные: рассмотрен процесс продольного точения заготовки из стали марки Ст5пс резцом с напайной пластиной из твердого сплава марки Т15К6 на токарном станке ТПУ-125М. Диаметр заготовки 100 мм, длина обработки заготовки равна 50 мм, шероховатость обработанной поверхности Ra = 2,5 мкм, $\theta = 520^0$С. В соответствии с табличными данными, приведенными в [14], глубина резания t = 0,5 мм, подача S = 0,144 мм/об.

В результате получены графики изменения частоты вращения шпинделя и электроприводов подач (рис. 6, 7), из которых видно, что процесс резания начинается после установочного перемещения, при этом частота вращения привода продольной подачи в установившемся режиме равна 430 об/мин.

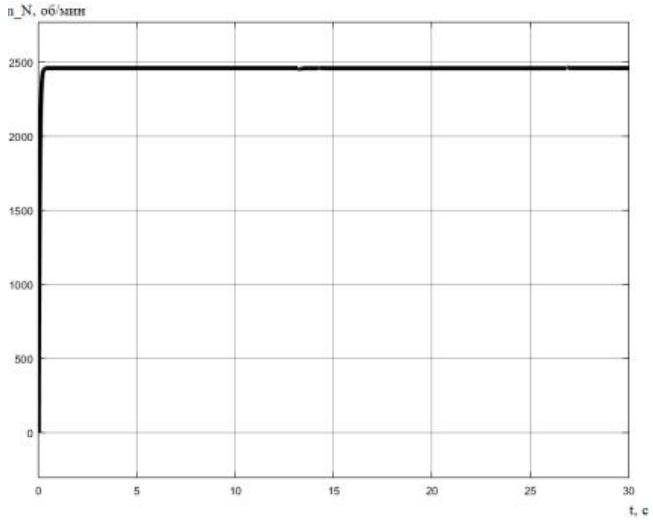

Рис. 6. График изменения частоты вращения шпинделя

Fig. 6. Graph of the spindle speed change

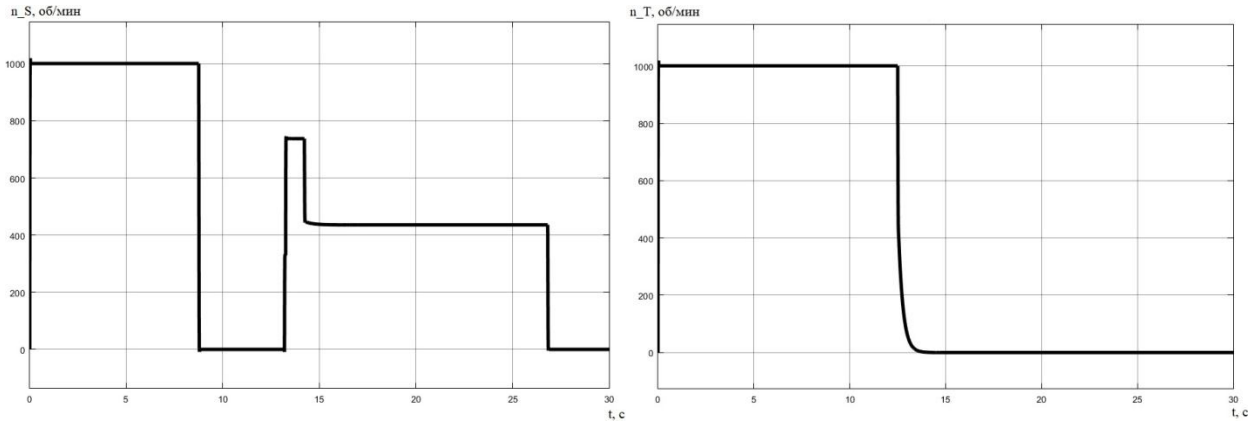

Рис. 7. Графики изменения частоты вращения электроприводов продольной n_S и поперечной n_T подач

Fig. 7. Graphs of changes in the speed of electric drives of longitudinal n_s and transverse n_t feed

Зависимость, иллюстрирующая изменение продольной подачи на оборот во времени, представлена на рисунке 8, по которому видно, что подача в момент резания снижается по сравнению с изначально заданной S = 0,144 мм/об для обеспечения требуемой шероховатости на основе информации о температуре в зоне резания.

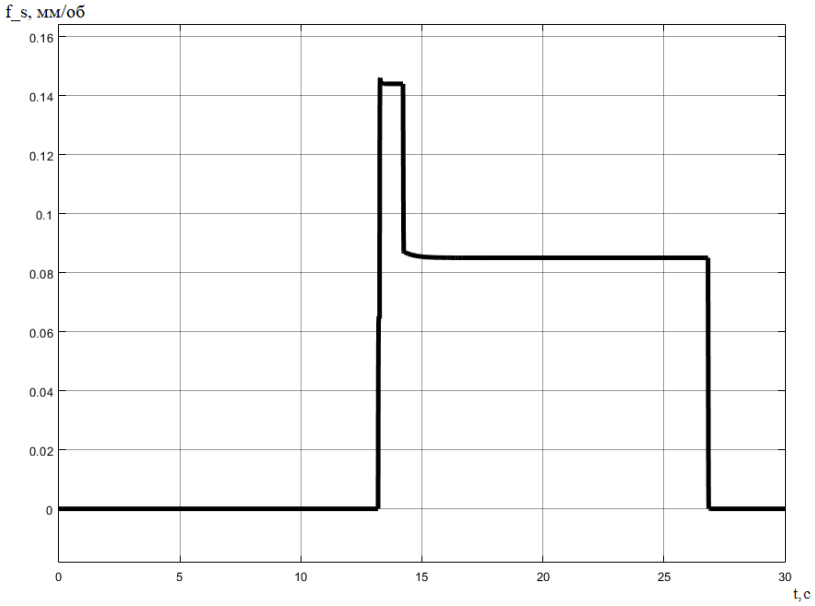

Рис. 8. График изменения подачи на оборот во времени

Fig. 8. Graph of feed changes per turn over time

На рисунке 9 представлены графики изменения положения режущего инструмента в системе координат станка, из которого видно, что после установочного перемещения осуществляется движение режущего инструмента до достижения требуемой длины обработки детали 50 мм (изменение координаты Z от 70 до 120 мм) при заданной глубине резания 0,5 мм (координата X).

Полученная модель также позволяет анализировать изменение температуры в зоне резания в процессе обработки (рис. 10).

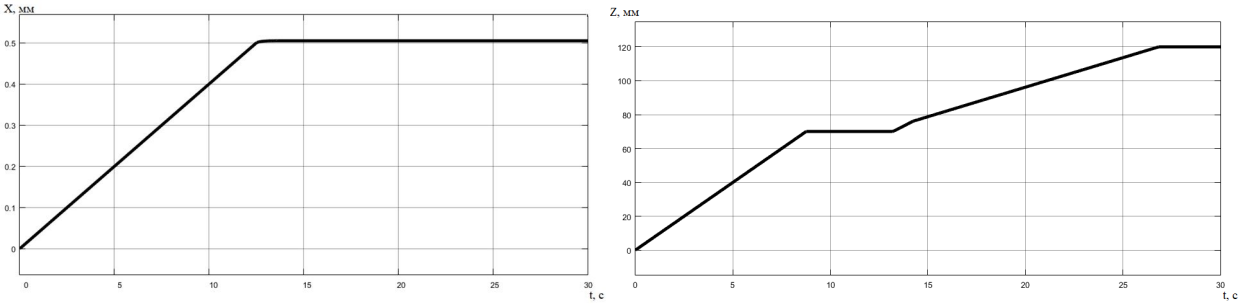

Рис. 9. Графики изменения положения инструмента по осям X и Z во времени

Fig. 9. Graphs of changes in the tool position along the X and Z axes over time

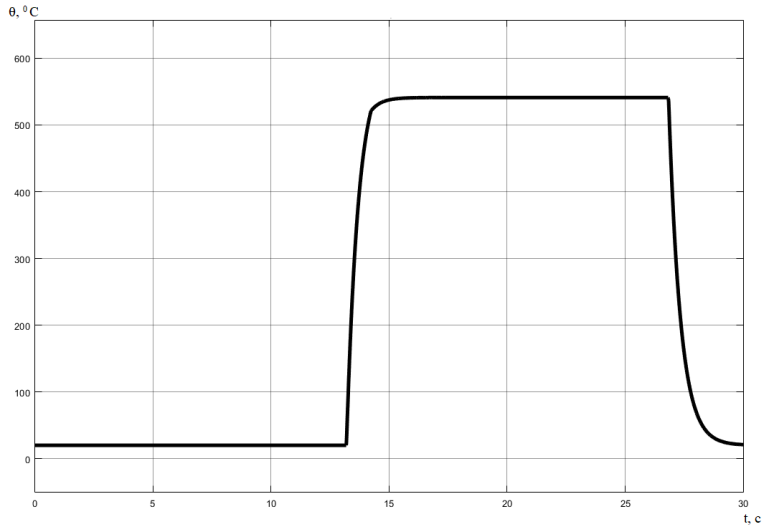

Рис. 10. График изменения температуры в зоне резания

Fig. 10. Graph of temperature changes in the cutting zone

Выводы

Таким образом, на основе использования эмпирических зависимостей скорости, силы, температуры резания, а также математического описания динамических процессов, протекающих в приводах подач и главного вращения, была получена обобщенная модель системы управления токарной обработкой деталей; разработано алгоритмическое и программное обеспечение для отображения параметров в виде временных графиков. Разработанная математическая модель позволяет анализировать алгоритмы управления режимами токарной обработки деталей. Модель может быть полезна при решении инженерных и научно-исследовательских задач, направленных на повышение точности резания.

Список литературы

1. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.

2. Каиров В. А., Каиров А. С. Математическое моделирование оптимальных режимов резания при токарной обработке конструкционных материалов на станках с ЧПУ // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2007. № 1 (33). С. 111–116.

3. Муслимов А. П., Куц В. А. Разработка математической модели процесса резания при токарной обработке // Известия вузов Кыргызстана. 2011. № 6. С. 25–28.

4. Селезнев Ю. Н., Яцун Е. И., Хомутов Р. Н. Методика получения математических моделей процесса токарной обработки изделий на станках с ЧПУ //

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2013. № 3. С. 23–28.

5. Моделирование процесса прерывистого резания и оптимизация механической обработки поверхностей с неоднородным припуском / Т. А. Дуюн, А. В. Гринек, Л. Р. Хакимов, В. Никольская, Д. С. Баранов // Наукоемкие технологии инновации: сб. тр. конф. БГТУ им. В. Г. Шухова. Белгород, 2014. С. 245–251.

6. Математическая модель уточнения режимов резания для обеспечения точности токарной обработки нежёстких валов на станках с ЧПУ / А. А. Жданов, А. Л. Плотников, Ю. Л. Чигиринский, И. В. Фирсов // Научные труды SWorld. 2015. Вып. 4, т. 3. С. 41–47.

7. Мостовой В. Д., Бирюков В. П. Компенсация взаимосвязи контуров управления поперечной и продольной подачи на основе редуцированной модели токарной обработки // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2018. № 1 (25). С. 151–166.

8. Зарипов А. Р. Алгоритмы логического управления температурно-силовыми режимами процесса механообработки в условиях неопределенности: автореф. дис. … канд. техн. наук. Уфа, 2008. 14 с.

9. Титов В. С., Бобырь М. В., Кулабухов С. А. Нечетко-логическая система управления стабилизацией процесса резания деталей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 3. С. 54–58.

10. Гринек А. В., Рубанов В. Г. Использование нейро-нечетких моделей в построении систем управления процессом резания // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах / Санкт-Петербурский государственный университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина). СПб., 2015. Вып. 1. С. 437–441.

11. Математическое моделирование и оптимизация процессов механической обработки как средство управления технологическими параметрами на основе нечеткой логики / Т. А. Дуюн, В. Г. Рубанов, А. В. Хуртасенко, А. В. Гринек, Е. Б. Кариков, М. Е. Лесунов // Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области: сб. тр. конф. / БГТУ им. В. Г. Шухова. Белгород, 2015. С. 138–156.

12. Описание процесса резания нейросетевыми моделями и управление механической обработкой на основе нечеткого регулирования / Т. А. Дуюн, В. Г. Рубанов, А. В. Гринек, А. В. Хуртасенко, М. Е. Лесунов // Региональная научно-

техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области: сб. тр. конф. / БГТУ им. В. Г. Шухова. Белгород, 2016. С. 140–149.

13. Гринек А. В., Рыбина А. В. Нечеткая модель вывода значения скорости резания на основе данных имитационного моделирования // Вестник ИрГТУ. 2016. № 12 (119). С. 109-118.

14. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Ю. А. Абрамов, В. Н. Андреев, Б. И. Горбунов [и др.]. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. Т. 2. 496 с.

15. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век. 2008. 368 с.

16. Резников А. Н., Резников Л. А. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.

References

1. Makarov A. D. Optimizaciya processov rezaniya [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 278 p. (In Russ.)

2. Kairov V. A., Kairov A. S. Matematicheskoe modelirovanie optimal'nyh rezhimov rezaniya pri tokarnoj obrabotke konstrukcionnyh materialov na stankah s CHPU [Mathematical modeling of optimal cutting modes for turning structural materials on CNC machines.]. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya = Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering*, 2007, no. 1 (33), pp. 111–116. (In Russ.)

3. Muslimov A. P., Kuc V. A. Razrabotka matematicheskoj modeli processa rezaniya pri tokarnoj obrabotke [Development of a mathematical model of the cutting process during turning]. *Izvestiya vuzov Kyrgyzstana = Izvestiya vuzov Kirghizstan,* 2011, no. 6, pp. 25–28. (In Russ.)

4. Seleznev Yu. N., Yacun E. I., Homutov R. N. Metodika polucheniya matematicheskih modelej processa tokarnoj obrabotki izdelij na stankah s CHPU [Methodology for obtaining mathematical models of the process of turning products on CNC machines]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*, 2013, no. 3, pp. 23–28. (In Russ.)

5. Duyun T. A., Grinek A. V., Hakimov L. R., Nikol'skaya V., Baranov D. S. Modelirovanie processa preryvistogo rezaniya i optimizaciya mekhanicheskoj obrabotki poverhnostej s neodnorodnym pripuskom [The modeling process is interrupted cut and optimization of machining surfaces with non-uniform allowance]. Naukoemkie tekhnologii

innovacii [Knowledge-intensive technologies and innovations]. Belgorod, Belgorod st. Techn. Univ. im V. G. Shukhov Publ., 2014, pp. 245–251. (In Russ.)

6. Zhdanov A. A., Plotnikov A. L., Chigirinskij Yu. L., Firsov I. V. Matematicheskaya model' utochneniya rezhimov rezaniya dlya obespecheniya tochnosti tokarnoj obrabotki nezhyostkih valov na stankah s CHPU [A mathematical model refinement cutting for precision turning of non-rigid shafts CNC]. *Nauchnye trudy SWorld = Scientific Works SWorld*, 2015, is. 4, vol. 3, pp. 41–47. (In Russ.)

7. Mostovoj V. D., Biryukov V. P. Kompensaciya vzaimosvyazi konturov upravleniya poperechnoj i prodol'noj podachi na osnove reducirovannoj modeli tokarnoj obrabotki [Payment of the relationship of the control loops of transverse and longitudinal flow on the basis of the reduced model turning]. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, Systems and Networks in Economics, Technology, Nature and Society,* 2018, no. 1 (25), pp. 151–166. (In Russ.)

8. Zaripov A. R. Algoritmy logicheskogo upravleniya temperaturno-silovymi rezhimami processa mekhanoobrabotki v usloviyah neopredelennosti. Diss. kand. tekhn. nauk [Algorithms for logical control of temperature and power modes of the machining process under uncertainty: abstract of the thesis. Cand. tech. sci. diss.]. Ufa, 2008. 14 p. (In Russ.)

9. Titov V. S., Bobyr' M. V., Kulabuhov S. A. Nechetko-logicheskaya sistema upravleniya stabilizaciej processa rezaniya detalej [Fuzzy logic control system for the stabilization of the cutting process of parts. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroeni*e = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation,* 2013, no. 3, pp. 54–58. (In Russ.)

10. Grinek A. V., Rubanov V. G. [The use of neuro-fuzzy models in the construction of cutting process control systems]. Vserossijskaya nauchnaya konferenciya po problemam upravleniya v tekhnicheskih sistemah [All-Russian Scientific Conference on Management Problems in Technical Systems]. St. Petersburg, St.-Petersburg st. Univ. "LETI" named after V. I. Ulyanov (Lenin) Publ., 2015, is. 1, pp. 437–441. (In Russ.)

11. Duyun T. A., Rubanov V. G., Hurtasenko A. V., Grinek A. V., Karikov E. B., Lesunov M. E. [Mathematical modeling and optimization of mechanical processing processes as a means of controlling technological parameters based on fuzzy logic]. Regional'naya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya po itogam konkursa orientirovannyh fundamental'nyh issledovanij po mezhdisciplinarnym temam, provodimogo Rossijskim fondom fundamental'nyh issledovanij i Pravitel'stvom Belgorodskoj oblasti. Sbornik trudov konferentsii [Regional scientific and technical conference on the results of the competition of

oriented fundamental research on interdisciplinary topics, conducted by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Belgorod Region. Collection of conference proceedings]. Belgorod, BGTU im. V. G. Shuhova Publ., 2015, pp. 138–156. (In Russ.)

12. Duyun T. A., Rubanov V. G., Grinek A. V., Hurtasenko A. V., Lesunov M. E. [Description of the process of cutting with neural network models and control of mechanical processing on the basis of fuzzy regulation]. Regional'naya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya po itogam konkursa orientirovannyh fundamental'nyh issledovanij po mezhdisciplinarnym temam, provodimogo Rossijskim fondom fundamental'nyh issledovanij i Pravitel'stvom Belgorodskoj oblasti. Sbornik trudov konferentsii [Regional scientific and technical conference on the results of the competition of oriented fundamental research on interdisciplinary topics conducted by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Belgorod Region. Collection of conference proceedings]. Belgorod, BGTU im. V. G. Shuhova Publ., 2016, pp. 140–149. (In Russ.)

13. Grinek A. V., Rybina A. V. Nechetkaya model' vyvoda znacheniya skorosti rezaniya na osnove dannyh imitacionnogo modelirovaniya [Fuzzy model for the output of the cutting speed value based on simulation data]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Irkutsk Technical University*, 2016, no. 12 (119), pp. 109–118. (In Russ.)

14. Abramov Yu. A., Andreev V. N., Gorbunov B. I., eds. Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya [Handbook of the technologist-machine-builder]. 4th ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, vol. 2. 496 p. (In Russ.)

15. German-Galkin S. G. Matlab & Simulink. Proektirovanie mekhatronnyh sistem na PK [Designing mechatronic systems on a PC]. St. Petersburg, KORONA-Vek Publ., 2008. 368 p. (In Russ.)

16. Reznikov A. N., Reznikov L. A. Teplovye processy v tekhnologicheskih sistemah [Thermal processes in technological systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 288 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Рубанов Василий Григорьевич, доктор технических наук, профессор кафедры технической кибернетики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация,
e-mail: vgrubanov@gmail.com

Vasiliy G. Rubanov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Technical Cybernetics, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation,
e-mail: vgrubanov@gmail.com

Сильченко Сергей Алексеевич, магистрант кафедры технической кибернетики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: sergej-silchenko@yandex.ru

Sergei A. Silchenko, Undergraduate of the Department of Technical Cybernetics, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: sergej-silchenko@yandex.ru

Рыбин Илья Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: intiret@gmail.com

Ilya A. Rybin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Technical Cybernetics, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: intiret@gmail.com

Рыбина Анна Васильевна, аспирант кафедры технической кибернетики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: anna.vasilevna@mai.ru

Anna V. Rybina, Post-Graduate Student, Department of Technical Cybernetics, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: anna.vasilevna@mai.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 535.015

Тенденции применения оптоакустического метода для визуализации биологических тканей

Д. А. Кравчук[1] ✉

[1] Южный федеральный университет ИНЭП
ул. Шевченко 2, корп. «Е», г. Таганрог 347922, Российская Федерация

✉ e-mail: kravchukda@sfedu.ru

Резюме

Цель исследований. *Оптоакустическая визуализация – это метод визуализации, при котором контраст изображения зависит от коэффициента оптического поглощения отображаемой ткани. Техника визуализации позволяет различать здоровую и больную ткань с более высоким разрешением, чем другие доступные в настоящее время методы функциональной визуализации. Кроме того, потенциал оптоакустической визуализации может быть использован в различных терапевтических процедурах, начиная от доставки и высвобождения лекарств до терапии и мониторинга под визуальным контролем.*

Методы*. В работе рассматривается текущее состояние метода оптоакустической визуализации в биомедицине с технологической точки зрения, освещаются различные биомедицинские и клинические применения оптоакустической визуализации и рассматриваются идеи относительно будущих направлений. Рассмотрены особенности использования спектроскопической оптоакустической визуализаци, гибридной оптоакустической и магнитно-оптоакустической визуализации. Высокий оптический контраст между гемоглобином крови и окружающей тканью делает оптоакустическую визуализацию оптимально подходящей технологией для визуализации кровеносных сосудов и распределения крови в органах.*

Результаты. *Рассмотрены различные применения оптоакустической визуализации, различные контрастные вещества – эндогенные и экзогенные, которые можно использовать для улучшения оптоакустической визуализации. Рассмотрены некоторые проблемы, которые необходимо решить для переноса оптоакустической визуализации в клиническую область.*

Заключение. *Оптоакустическая визуализация предлагает уникальные преимущества по сравнению с существующими методами визуализации. Область визуализации обширна и включает множество интересных приложений для обнаружения и диагностики пораженных тканей или процессов в них. Оптоакустика также используется для выявления патологии тканей и наблюдения за лечением.*

Ключевые слова: *оптоакустика; изображение; акустический сигнал; биологические ткани.*

© Кравчук Д. А., 2020

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

Для цитирования: Кравчук Д. А. Тенденции применения оптоакустического метода для визуализации биологических тканей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 64–74.

Поступила в редакцию 03.07.2020 *Подписана в печать 04.08.2020* *Опубликована 30.11.2020*

Trends in the Application of the Optoacoustic Method for Visualization of Biological Tissues

Denis A. Kravchuk[1] ✉

[1] Southern Federal University
2 Shevchenko str., corpus 2E, Taganrog 347922, Russian Federation

✉ e-mail: kravchukda@sfedu.ru

Abstract

Purpose of research. *Optoacoustic imaging is an imaging technique in which the contrast of an image is dependent on the absorbance of the displayed tissue. The imaging technique can distinguish between healthy and diseased tissue at a higher resolution than other functional imaging techniques currently available. In addition, the potential of optoacoustic imaging can be used in a variety of therapeutic procedures, ranging from drug delivery and release, to therapy and monitoring under image guidance.*

Methods. *This paper examines the current state of the art of optoacoustic imaging in biomedicine from a technological point of view, highlights various biomedical and clinical applications of optoacoustic imaging, and discusses ideas for future directions. The features of the use of spectroscopic optoacoustic visualization, hybrid optoacoustic and magnetic-optoacoustic visualization are considered. The high optical contrast between blood hemoglobin and surrounding tissue makes optoacoustic imaging an optimal technology for imaging blood vessels and blood distribution in organs.*

Results. *Various applications of optoacoustic imaging, various contrast agents that can be used to improve optoacoustic imaging are considered. Some problems that need to be solved for the transfer of optoacoustic imaging to the clinical area are considered.*

***Conclusion**. Optoacoustic imaging offers unique advantages over existing imaging techniques. The imaging field is vast and includes many interesting applications for the detection and diagnosis of diseased tissues or processes in them. Optoacoustics is also used to detect tissue abnormalities and monitor treatment.*

Keywords: *optoacoustics; image; acoustic signal; biological tissues.*

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

For citation: Kravchuk D. A. Trends in the Application of the Optoacoustic Method for Visualization of Biological Tissues. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(3/4): 64–74. (In Russ.)

Received 03.07.2020 *Accepted 04.08.2020* *Published 30.11.2020*

Введение

Биомедицинская оптоакустическая визуализация – это метод визуализации, контрастность которого определяется оптическими свойствами поглощения тканей и других объектов, отображаемых в [1; 2]. Визуализация осуществляется посредством обнаружения оптоакустических сигналов, генерируемых в результате поглощения энергии, вызванного импульсным лазерным излучением. Поскольку физиологические и патологические изменения часто изменяют состав ткани и связанное с ним оптическое поглощение, величина принимаемого оптоакустического сигнала может показывать различные параметры живой ткани. Преимущества мощного потенциала оптоакустической визуализации для обнаружения рака использовали авторы [3] и диагностику уязвимых атеросклеротических бляшек [4; 5]. Поскольку контраст изображения достигается за счет оптических свойств поглощения лазерного излучения тканей, визуализация может быть выполнена с использованием эндогенного или экзогенного контраста в ткани. Первичным эндогенным оптическим поглотителем в ткани в ближней инфракрасной области спектра является гемоглобин. Коэффициент поглощения гемоглобина на несколько порядков превышает коэффициент поглощения окружающими тканями [6]. Оптоакустическая визуализация сосудов крови in vivo [7] использовалась для мониторинга ангиогенеза опухоли, в атеросклеротических бляшках, оксигенации крови [8], поиска внутриэритроцитарных инфекций [9], меланомы кожи [10]. На длинах волн выше 1100 нм может преобладать оптическое поглощение других компонентов ткани, таких как липиды, что полезно при визуализации других типов тканей [11]. Для улучшения оптоакустического контраста вводят различные экзогенные контрастные вещества для воздействия на определенные области или патологии. Эти контрастные вещества включают использование красителей [12], наночастиц [13; 14] или других поглотителей [15], направленных на различные рецепторы на поверхности больных клеток.

Материалы и методы

Оптоакустическая визуализация работает за счет использования импульсной энергии лазерного излучения, поглощаемой ткани. Энергия, поглощенная тканью, преобразуется в тепло, после чего происходит быстрое тепловое расширение и вызывает излучение волны акустического давления, пропорциональной плотности энергии излучения Ф, коэффициенту поглощения облучаемой среды μ_a и коэффициенту Грюнайзена ткани Г:

$$P(\lambda, z) = \mu_a(\lambda)\Phi(\lambda, z)\Gamma.$$

Результирующие акустические переходные процессы являются широкополосными и регистрируется ультра-

звуковым преобразователем. Реконструкция результирующего изображения выполняется путем обратного расчета источника.

Для системы оптоакустической визуализации необходимо два основных компонента – импульсный источник лазерного излучения и акустический приемник. Обычно в качестве источника энергии используется импульсный наносекундный лазер. Лазерный импульс доставляется к ткани через комбинацию оптических волокон или зеркал. Акустические детекторы могут быть одноэлементными или матричными ультразвуковыми преобразователями с различными центральными частотами. Приемник ультразвука необходим для приема акустических сигналов, сформированных при оптоакустическом преобразовании, а микропроцессор используется для обработки сбора данных, реконструкции изображения и отображения. В простейшей установке оптоакустической визуализации используется сфокусированный одноэлементный ультразвуковой преобразователь. Эта конфигурация, которая обычно используется в системах оптоакустической микроскопии. Для получения изображения требуется, чтобы датчик проводил механическое сканирование для получения двумерного изображения. Этот тип визуализации требует минимальной реконструкции изображения, поскольку амплитуда в каждой позиции вдоль А-линии отображается в соответствующий пиксель изображения. В системах оптоакустической микроскопии используются преобразователи с высокими резонансными частотами, и они обладают преимуществом высокого пространственного разрешения при относительно большой глубине визуализации по сравнению с методами оптической визуализации. Дополнительная методика сканирования может использоваться для создания оптоакустических томографических изображений, которые основаны на методах реконструкции для формирования изображений [16]. Для повышения скорости получения изображения и уменьшения потребности в механическом сканировании можно использовать преобразователи с ультразвуковой матрицей для получения оптоакустических изображений в реальном времени [17]. Реконструкция изображения, называемая формированием луча, требуется для обработки сигналов, захваченных элементами массива [18]. Оптоакустические изображения в реальном времени или почти в реальном времени могут быть получены при условии, что частота следования импульсов лазерного источника достаточно высока (т. е. 30 импульсов в секунду).

Многоволновая или спектроскопическая оптоакустическая визуализация используется для восстановления локального спектра оптического поглощения в изображаемых областях [5]. Коэффициент оптического поглощения

может быть рассчитан обратно на соответствующих длинах волн путем нормирования полученных оптоакустических сигналов на их флюенс, коэффициент Грюнайзена окружающей среды, а также с учетом зависящего от длины волны рассеяния [3]. Изучение формируемых уникальных спектров поглощения на соответствующем оптоакустическом изображении может позволить определить состав ткани [19; 20; 21], заполнение липидами бляшек или рост злокачественных новообразований. Возможность получать изображения с разными длинами волн и плотностью потока энергии, а также применять различные методы обработки оптоакустического сигнала обеспечивает необходимую основу для разработки новых клинических исследований методов точного изображения тканей *in vivo* в режиме реального времени.

Наиболее распространенной гибридной технологией визуализации в сочетании с оптоакустической визуализацией является ультразвук. Эта комбинация ультразвуковой и оптоакустической визуализации основана на взаимодополняющем характере этих методов визуализации [22]. Ультразвук уже много лет широко используется в клинической практике. Это относительно недорогая, простая в использовании технология визуализации в реальном времени. Его неинвазивность позволила ему для широкого использования во многих диагностических учреждениях, в акушерстве, маммографии, кардиологии, а также для управления иглой при биопсии тканей. Ультразвук очень успешно визуализирует структуру и морфологию тканей. Однако способность ультразвука выявлять все аномалии в тканях ограниченна. Акустический контраст между здоровой и больной тканью может быть очень ограниченным, что затрудняет эффективную диагностику.

Магнитно-оптоакустическая визуализация – это метод, основанный на сочетании магнитодвигательного ультразвука и оптоакустической визуализации, он способен обнаруживать присутствие гибридных магнитных частиц [23]. В ситуациях, когда оптоакустический сигнал используется для обнаружения агрегации наночастиц [24; 25], отсутствие оптоакустического сигнала может указывать либо на отсутствие агрегации частиц, либо на полное отсутствие частиц.

Оптоакустическая визуализация также сочетается с оптической когерентной томографией, чтобы обеспечить дополнительный контраст для визуализации ткани [26]. Оптоакустику можно использовать для измерения насыщения кислородом [9], в то время как оптическую когерентную томографию можно использовать для измерения скорости кровотока до 10 мкм / с [27].

Результаты и их обсуждение

Одним из основных преимуществ оптоакустической визуализации являет-

ся ее способность отображать функциональную информацию благодаря сильному зависящему от длины волны оптическому поглощению оксигенированной и деоксигенированной крови или контрастных веществ. Многие методы функциональной визуализации, такие как позитронно-эмиссионная томография и однофотонная эмиссионная компьютерная томография, основаны на использовании ядерных радиоизотопов для обнаружения гамма-излучения, но имеют низкое пространственное разрешение. Методы оптического изображения могут использоваться для получения функциональной информации, но страдают от плохого пространственного разрешения на глубине более 0,5 мм из-за высоких свойств оптического рассеяния тканей. Акустическое рассеяние в ткани на несколько порядков слабее, чем оптическое рассеяние, и поэтому оптоакустическая визуализация преодолевает ограничение глубины оптических методов, обнаруживая акустические фононы вместо баллистических фотонов. Оптоакустика может визуализировать взаимодействие света и ткани с высоким пространственным разрешением на глубине в несколько десятков миллиметров, в зависимости от длины волны лазера и частоты используемого преобразователя. Как правило, пространственное разрешение оптоакустического изображения выше 0,5 мм определяется ультразвуковым преобразователем. Однако в пределах глубины проникновения баллистических фотонов включение точной оптической фокусировки приводит к оптоакустической микроскопии с оптическим разрешением [28].

Оптоакустическая визуализация идеально подходит для получения изображений в областях, где существуют различия в оптическом поглощении. Эти контрастные различия могут возникать естественным образом, например в атеросклеротических бляшках или ангиогенезе в опухоли. При атеросклерозе наличие большого липидного пула или тонкой фиброзной капсулы является сильным индикатором уязвимых бляшек и может быть исследовано с помощью многоволновой внутрисосудистой оптоакустической визуализации [11].

Собственное оптическое поглощение компонентов ткани может использоваться для идентификации компонентов ткани. Поскольку амплитуда оптоакустического отклика пропорциональна коэффициенту оптического поглощения, оптоакустическая визуализация может дифференцировать типы тканей на основе эндогенного контраста в ткани. Кровь (оксигенированный и деоксигенированный гемоглобин) доминирует в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн [9].

Экзогенные контрастные агенты могут создавать оптоакустический контраст с величиной в несколько раз большей, чем только внутренний эндо-

генный контраст. Плазмонные наночастицы благородных металлов, в основном сделанные из золота [24; 25] и серебра, являются наиболее часто используемыми экзогенными контрастными агентами.

Выводы

Оптоакустическая визуализация – это метод визуализации, позволяющий отображать коэффициент оптического поглощения ткани. Это реализуется путем сопряжения импульсного лазерного источника с акустическим приемником. В оптоакустическую систему могут быть интегрированы различные типы лазеров и ультразвуковых приемников в зависимости от области применения визуализации. Оптоакустическая визуализация хорошо подходит для комбинированной визуализации с несколькими другими методами визуализации, она по своей природе дополняет и синергетична с ультразвуком, поэтому эти технологии визуализации часто совмещаются.

Список литературы

1. Kruger R. A. Photoacoustic ultrasound // Med. Phys. 1994. N 21(1). P. 127–131.

2. Старченко И. Б., Кравчук Д. А., Кириченко И. А. Прототип оптоакустического лазерного цитометра // Медицинская техника. 2017. № 5 (305). С. 4–7.

3. Multiwavelength Photoacoustic Imaging and Plasmon Resonance Coupling of Gold Nanoparticles for Selective Detection of Cancer / S. Mallidi, T. Larson, J. Tam [et al.] // Nano Lett 2009. N 9(8). P. 2825–2831.

4. Ex vivo Characterization of Atherosclerosis using Intravascular Photoacoustic Imaging / S. Sethuraman, J. H. Amirian, S. H. Litovsky [et al.] // Opt. Express. 2007. N 15(25). P. 16657–16666.

5. Spectroscopic intravascular photoacoustic imaging to differentiate atherosclerotic plaques / S. Sethuraman, J. H. Amirian, S. H. Litovsky [et al.] // Opt. Express. 2008. N 16(5). P. 3362–7.

6. Prahl S A. Optical properties spectra compiled by Scott Prahl. 2001. URL: http://omlc.ogi.edu/spectra/ (дата обращения: 15.05.2020).

7. Hu S., Wang L. V. Photoacoustic imaging and characterization of the microvasculature // Journal of Biomedical Optics. 2010. No 15(1). P. 011101–011115.

8. Kravchuk D. A., Voronina K. A. Studies of red blood cell aggregation and blood oxygenation on the basis of the optoacoustic effect in biological media // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. 2020. Vol. 6, N 1. H. 10307.

9. Кравчук Д. А. Математическая модель обнаружения внутриэритроцитарных патологий с помощью оптоакустического метода // *Biomedical Photonics.* 2018. Vol. 7, N 3. P. 36–42.

10. Three-dimensional imaging of skin melanoma in vivo by dualwavelength photoacoustic microscopy / J. T. Oh, M. L. Li, H. F. Zhang [et al.] // J. Biomed. Opt. 2006. No. 11(3). P. 34032.

11. Detection of lipid in atherosclerotic vessels using ultrasoundguided spectroscopic intravascular photoacoustic imaging / B. Wang, J. L. Su, J. Amirian [et al.] // Opt. Express. 2010. Vol. 1, N 18(5). P. 4889–4897.

12. Acoustic fingerprints of dye-labeled protein submicrosphere photoacoustic contrast agents / M. A. McDonald, L. Jankovic, K. Shahzad [et al.] // J. Biomed. Opt. 2009. N 14(3). P. 034032.

13. Photoacoustic imaging of multiple targets using gold nanorods / P. C. Li, C. W. Wei, C. K. Liao [et al.] // IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control. 2007. N 54(8). P. 1642–1647.

14. Photoacoustic imaging and temperature measurement for photothermal cancer therapy / J. Shah, S. Park, S. Aglyamov [et al.] // J. Biomed. Opt. 2008. N 13(3). P. 034024.

15. Quantum dots as multimodal photoacoustic and photothermal contrast agents / E. V. Shashkov, M. Everts, E. I. Galanzha [et al.] // Nano. Lett. 2008. № 8(11). P. 3953–8.

16. Wang L. V. Prospects of photoacoustic tomography // Med. Phys. 2008. N 35(12). P. 5758–5767.

17. Adaptive beamforming for photoacoustic imaging / S. Park, A. B. Karpiouk, S. R. Aglyamov [et al.] // Opt. Lett. 2008. N 33(12). P. 1291–1293.

18. Кравчук Д. А. Метод повышения помехоустойчивости в оптоакустической системе визуализации // Научное приборостроение. 2019. Т. 29, № 4. С. 119–123.

19. Кравчук Д. А. Экспериментальное исследование акустических сигналов при оптоакустическом эффекте в суспензии с полистирольными дисками как моделями эритроцитов // Прикладная физика. 2020. N 4. С. 70–73.

20. Кравчук Д. А. Моделирование акустических сигналов при оптоакустическом эффекте для обнаружения эритроцитов различной формы лазерным цитометром // Прикладная физика. 2019. № 5. С. 93–99.

21. Kravchuk D. A. Experimental studies on the excitation and registration of an optoacoustic signal in a liquid // IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2019). Tomsk, 2019. P. 8729639.

22. Combined ultrasound and optoacoustic system for realtime high-contrast vascular imaging in vivo / J. J. Niederhauser, M. Jaeger, R. Lemor [et al.] // IEEE Trans Med Imaging. 2005. N 24(4). P. 436–440.

23. Pulsed magneto-acoustic imaging / M. Mehrmohammadi, J. Oh, S. R. Aglyamov, [et al.] // Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. New York, 2009. P. 4771–4774.

24. Molecular specific optoacoustic imaging with plasmonic nanoparticles / S. Mallidi, T. Larson, J. Aaron [et al.] // Opt. Express. 2007. N 15(11). P. 6583–6588.

25. Кравчук Д. А., Орда-Жигулина Д. В. Экспериментальные исследования оптоакустического воздействия на модель эритроцитов в присутствии углеродных наночастиц // Biomedical Photonics. 2019. Т. 8, № 3. С. 11–18.

26. Simultaneous multimodal imaging with integrated photoacoustic microscopy and optical coherence tomography / S. Jiao, Z. Xie, H. F. Zhang [et al.] // Opt. Lett. 2009. N 34(19). P. 2961–2963.

27. Phase-resolved optical coherence tomography and optical Doppler tomography for imaging blood flow in human skin with fast scanning speed and high velocity sensitivity / Y. Zhao, Z. Chen, C. Saxer [et al.] // Opt. Lett. 2000. N 25(2). P. 114–116.

28. Optical-resolution photoacoustic microscopy for in vivo imaging of single capillaries / K. Maslov, H. F. Zhang, S. Hu [et al.] // Opt. Lett. 2008. N 33(9). P. 929–931.

References

1. Kruger R. A. Photoacoustic ultrasound. *Med. Phys*., 1994, no. 21(1), pp. 127–131.

2. Starchenko I. B., Kravchuk D. A., Kirichenko, I. A. Prototip optoakusticheskogo lazernogo tsitometra [An Optoacoustic Laser Cytometer Prototype]. *Meditsinskaya tekhnika = Biomedical Engineering,* 2018, no. 51(5), pp. 308–312. (In Russ.)

3. Mallidi S., Larson T., Tam J., eds. Multiwavelength Photoacoustic Imaging and Plasmon Resonance Coupling of Gold Nanoparticles for Selective Detection of Cancer. *Nano. Lett.*, 2009, no. 9(8), pp. 2825–2831.

4. Sethuraman S., Amirian J. H., Litovsky S. H., eds. Ex vivo Characterization of Atherosclerosis using Intravascular Photoacoustic Imaging. *Opt. Express*, 2007, no. 15(25), pp. 16657–16666.

5. Sethuraman S., Amirian J. H., Litovsky S. H., eds. Spectroscopic intravascular photoacoustic imaging to differentiate atherosclerotic plaques. *Opt. Express*, 2008, no. 16(5), pp. 3362–3367.

6. Prahl S. A. Optical properties spectra compiled by Scott Prahl. 2001. Available at: http://omlc.ogi.edu/spectra/ (accessed 15.05.2020).

7. Hu S., Wang L. V. Photoacoustic imaging and characterization of the microvasculature. *Journal of Biomedical Optics*, 2010, no. 15(1), pp. 011101–011115.

8. Kravchuk D. A., Voronina K. A. Studies of red blood cell aggregation and blood oxygenation on the basis of the optoacoustic effect in biological media. *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*, 2020, vol. 6, no. 1, p. 10307. (In Russ.)

9. Kravchuk D. A. Matematicheskaya model' obnaruzheniya vnutrieritrotsitarnykh patologii s pomoshch'yu optoakusticheskogo metoda [Mathematical model of detection of

intra-erythrocyte pathologies using optoacoustic method]. *Biomedical Photonics*, 2018, vol. 7, no. 3, pp. 36–42. (In Russ.)

10. Oh J. T., Li M. L., Zhang H. F., eds. Three-dimensional imaging of skin melanoma in vivo by dualwavelength photoacoustic microscopy. *J. Biomed. Opt*., 2006, no. 11(3), p. 34032.

11. Wang B., Su J. L., Amirian J., eds. Detection of lipid in atherosclerotic vessels using ultrasoundguided spectroscopic intravascular photoacoustic imaging. *Opt. Express*, 2010, no. 18(5), pp. 4889–4897.

12. McDonald M. A., Jankovic L., Shahzad K., eds. Acoustic fingerprints of dye-labeled protein submicrosphere photoacoustic contrast agents. *J. Biomed. Opt*., 2009, no. 14(3), pp. 034032.

13. Li P. C., Wei C. W., Liao C. K., eds. Photoacoustic imaging of multiple targets using gold nanorods. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2007, no. 54(8), pp. 1642–1647.

14. Shah J., Park S., Aglyamov S., eds. Photoacoustic imaging and temperature measurement for photothermal cancer therapy. *J. Biomed. Opt*., 2008, no. 13(3), p. 034024.

15. Shashkov E. V., Everts M., Galanzha E. I., eds. Quantum dots as multimodal photoacoustic and photothermal contrast agents. *Nano. Lett*., 2008, no. 8(11), pp. 3953–3958.

16. Wang L. V. Prospects of photoacoustic tomography. *Med. Phys.,* 2008, no. 35(12), p. 5758–5767.

17. Park S., Karpiouk A. B., Aglyamov S. R., eds. Adaptive beamforming for photoacoustic imaging. *Opt. Lett*., 2008, vol. 33, no. 12, pp. 1291–1293.

18. Kravchuk, D. A. Metod povysheniya pomekhoustoichivosti v optoakusticheskoi sisteme vizualizatsii [Method for increasing noise immunity in an optoacoustic imaging system]. *Nauchnoe Priborostroenie = Scientific Instrumentation*, 2019, vol. 29, no. 4, pp. 119–123. (In Russ.)

19. Kravchuk D. A. Eksperimental'noe issledovanie akusticheskikh signalov pri optoakusticheskom effekte v suspenzii s polistirol'nymi diskami kak modelyami eritrotsitov [An experimental study of acoustic signals with an optoacoustic effect in suspension with polystyrene disks as models of red blood cells]. *Prikladnaya fizika = Applied Physics*, 2020, no. 4, pp. 70–73. (In Russ.)

20. Kravchuk D. A. Modelirovanie akusticheskikh signalov pri optoakusticheskom effekte dlya obnaruzheniya eritrotsitov razlichnoi formy lazernym tsitometrom [Simulation of acoustic signals with an optoacoustic effect for the detection of red blood cells of various shapes by a laser cytometer]. *Prikladnaya fizika = Applied Physics*, 2019, no. 5, pp. 93–99. (In Russ.)

21. Kravchuk D. A. Experimental studies on the excitation and registration of an optoacoustic signal in a liquid. IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2019). Tomsk, 2019, p. 8729639.

22. Niederhauser J. J., Jaeger M., Lemor R., eds. Combined ultrasound and optoacoustic system for realtime high-contrast vascular imaging in vivo. IEEE Trans Med Imaging, 2005, no. 24(4), pp. 436–440.

23. Mehrmohammadi M., Oh J., Aglyamov S. R., eds. Pulsed magneto-acoustic imaging. Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. New York, 2009, pp. 4771–4774.

24. Mallidi S., Larson T., Aaron J., eds. Molecular specific optoacoustic imaging with plasmonic nanoparticles. *Opt. Express*, 2007, no. 15(11), pp. 6583–6588.

25. Kravchuk D. A., Orda-Zhigulina D. V. Eksperimental'nye issledovaniya optoakusticheskogo vozdeistviya na model' eritrotsitov v prisutstvii uglerodnykh nanochastits [Experimental studies of optoacoustic effect on the model of erythrocytes in the presence of carbon nanoparticles]. *Biomedical Photonics*, 2019, 8 (3), pp. 11–18. (In Russ.)

26. Jiao S., Xie Z., Zhang H. F., eds. Simultaneous multimodal imaging with integrated photoacoustic microscopy and optical coherence tomography. *Opt. Lett.*, 2009, no. 34(19), pp. 2961–2963.

27. Zhao Y., Chen Z., Saxer C., eds. Phase-resolved optical coherence tomography and optical Doppler tomography for imaging blood flow in human skin with fast scanning speed and high velocity sensitivity. *Opt. Lett.*, 2000, no. 25(2), pp. 114–116.

28. Maslov K., Zhang H. F., Hu S., eds. Optical-resolution photoacoustic microscopy for in vivo imaging of single capillaries. *Opt. Lett.*, 2008, no. 33(9), pp. 929–931.

Информация об авторе / Information about the Author

Кравчук Денис Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры электрогидроакустической и медицинской техники, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: kravchukda@sfedu.ru

Denis A. Kravchuk, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Electrohydroacoustic and Medical Equipment, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation, e-mail: kravchukda@sfedu.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 378:51-77

Статистический анализ успеваемости студентов в рамках теории латентных переменных

А. А. Маслак ✉ [1]

[1] Филиал Кубанского государственный университета
ул. Кубанская, 200, г. Славянск-на-Кубани 353560, Российская Федерация

e-mail: anatoliy_maslak@mail.ru

Резюме

Целью исследования *является выявление факторов, влияющих на успеваемость студентов в вузе.*
Методы. *Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: определить степень совместимости учебных дисциплин по направлению «Педагогическое образование», т. е. в какой степени учебные дисциплины определяют латентную переменную «успеваемость студентов»; провести мониторинг успеваемости студентов на 1–4 курсах обучения бакалавриата; исследовать факторы, влияющие на успеваемость студентов. Решение поставленных задач осуществлялось в рамках теории латентных переменных на основе модели Раша. Для статистической обработки результатов измерения успеваемости студентов использовался корреляционный и дисперсионный анализ.*
Результаты. *В статье в рамках теории латентных переменных сделан анализ успеваемости студентов на протяжении всех лет четырех лет обучения в бакалавриате. Показана совместимость учебных дисциплин бакалавриата, которые используются для определения успеваемости студентов вузе. Получены оценки результатов обучения студентов, а также местоположение учебных дисциплин на линейной шкале латентной переменной «успеваемость студентов» в логитах. Полученные оценки успеваемости студентов в логитах в большей степени дифференцируют студентов по их успеваемости, чем четырехбалльная система оценивания. Отмечено, что легкие дисциплины лучше других дифференцируют студентов с низкой успеваемостью, а трудные дисциплины лучше других дифференцируют студентов с высокой успеваемостью. Корреляционный анализ показал, что оценки успеваемости по учебным дисциплинам хорошо коррелируют между собой. Проведенный двухфакторный дисперсионный анализ выявил, что в среднем по всем кусам успеваемость девушек статистически значимо выше успеваемости юношей. Мониторинг успеваемости показал, что успеваемость студентов практически не зависит от курса обучения.*
Заключение. *Показана целесообразность и возможность применения теории латентных переменных для статистического анализа успеваемости студентов. В рамках этой теории успеваемость студентов рассматривается как латентная переменная, индикаторами которой являются учебные дисциплины. Успеваемость студентов дифференцируется в гораздо большей степени, чем при четырехбалльной системы оценивания. Кроме того, успеваемость студентов измеряется на линейной шкале в логитах, что позволяет использовать широкий класс статистических процедур для их анализа. В рамках теории латентных переменных решены все поставленные задачи.*

© Маслак А. А., 2020

Ключевые слова: *успеваемость обучения; латентная переменная; модель Раша; мониторинг; двухфакторный дисперсионный анализ.*

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

Для цитирования: Маслак А. А. Статистический анализ успеваемости студентов в рамках теории латентных переменных // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 75–89.

Поступила в редакцию 08.07.2020 *Подписана в печать 12.08.2020* *Опубликована 30.11.2020*

Statistical Analysis of Students' Performance in the Framework of the Theory of Latent Variables

Anatoly A. Maslak[1] ✉

[1] Branch of the Kuban State University
200 Kubanskya str., Slavyansk-on-Kuban 353560, Russian Federation

✉ e-mail: anatoliy_maslak@mail.ru

Abstract

Purpose of research *is to identify factors that affect the academic performance of students at the University.*
Methods*. To achieve this goal, there is need to solve following tasks: determine the degree of compatibility of academic disciplines in the speciality "Teacher education", that is, to what extent academic disciplines determine the latent variable "students' performance"; to monitor the progress of students in the 1st-4th years of undergraduate studies; investigate the factors that affect students' performance. The solution of the tasks was carried out within the framework of the theory of latent variables based on the Rasch model. Correlation and variance analysis were used for statistical processing of the results of measuring students' academic performance.*
Results. *In the article, within the framework of the theory of latent variables, the analysis of students' academic performance during all four years of undergraduate studies is made. The article shows the compatibility of undergraduate academic disciplines, which are used to determine the academic performance of university students. Estimates of students' performance, as well as the location of academic disciplines on a linear scale of the latent variable "students' performance" in logits are obtained. The estimates of students' academic performance in logits differentiate students by their academic performance to a greater extent than the four-point assessment system. It is noted that easy disciplines differentiate students with low academic performance better than others, and difficult disciplines differentiate students with high academic performance better than others. Correlation analysis showed that academic performance scores in academic disciplines correlate well with each other. The two-factor analysis of variance revealed that, on average, the performance of girls in all subjects is statistically significantly higher than that of boys. Monitoring of academic performance showed that students ' academic performance is almost independent of the grade of study.*
Conclusion. *The expediency and possibility of applying the theory of latent variables for statistical analysis of student performance are shown. Within the framework of this theory, student performance is considered as a latent variable, the indicators of which are academic disciplines. Students ' academic performance is differentiated to a much greater extent than with a four-point grading system. In addition, students ' academic performance is measured on a linear scale in logits, which allows a wide class of statistical procedures to be used for their analysis. Within the framework of the theory of latent variables, all the tasks have been solved.*

Keywords: *academic performance; latent variable; Rasch model; monitoring; two-factor analysis of variance.*

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

For citation: Maslak A. A. Statistical analysis of Students' Performance in the Framework of the Theory of Latent Variables. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(3/4): 75–89. (In Russ.)

Received 08.07.2020 *Accepted 12.08.2020* *Published 30.11.2020*

***

Введение

Качество образования в вузе является важным ресурсом для развития общества. Поэтому сейчас в области образования акцент сделан на оценку результатов обучения. Все это определяет актуальность многочисленных экспериментальных исследований, направленных на повышения качества образования [1; 2; 3]. Прежде всего акцентируется важность разработки валидных тестов, опирающихся на современную теорию тестологии [4; 5; 6]. Тесты и опросники рассматриваются как измерительные инструменты, исследуется точность измерения качества образования и других латентных переменных в зависимости от параметров тестов [7; 8; 9]. Накоплен большой опыт применения методов теории латентных переменных для проведения исследований в области образования [10; 11; 12]. Достаточно полно теория латентных переменных на русском языке отражена в работах [13; 14; 15].

Целью работы является анализ качества усвоения учебных дисциплин бакалавриата по направлению «Педагогическое образование». Исследуемой латентной переменной является «успеваемость студентов». Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Определить степень совместимости учебных дисциплин по направлению «Педагогическое образование», то есть в какой степени учебные дисциплины определяют латентную переменную «успеваемость студентов».

2. Провести мониторинг успеваемости студентов бакалавриата на 1 – 4 курсах обучения.

3. Исследовать факторы, влияющие на успеваемость студентов.

Материалы и методы

Решение поставленных задач осуществлялось в рамках теории латентных переменных на основе модели Раша. Сравнительный анализ этой теории по сравнению с классической теорией тестирования представлен в работах [16; 17; 18]. В отличие от классической теории тестирования оценки латентной переменной измеряются на линейной (интервальной) шкале, что позволяет использовать для их анализа широкий класс статистических процедур. Кроме того, количественно оценивается степень совместимости индикаторов,

определяющих латентную переменную. В данном исследовании индикаторами являются учебные дисциплины.

Для статистического анализа результатов обучения использовалась диалоговая система RUMM 2010 [19]. Анализировались оценки 2016–2019 гг. академической группы по направлению подготовки: 44.03.05. Педагогическое образование (с двумя профилями подготовки – математика, информатика)) филиала ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» в г. Славянске-на-Кубани. Группа состояла из 16 девушек и 8 юношей, всего 24 студента.

Результаты и их обсуждение

Прежде всего определялась совместимость учебных дисциплина на основе критерия Хи-квадрат. Уровень значимости критерия оказался равным 0,462, что превышает номинальное значение 0,05. Это означает, что все учебные дисциплины и определяют одну и ту же латентную переменную. Коэффициент Кронбах альфа равен 0,974, это свидетельствует о том, что студенты хорошо дифференцируются по своей успеваемости. Все это означает, что статистические данные (оценки студентов по учебным дисциплинам за 2016–2019 гг.) пригодны для обработки в рамках теории латентных переменных на основе модели Раша.

В рамках теории латентных переменных успеваемость студентов (латентная переменная) и индикаторы, которые ее характеризуют (учебные дисциплины), измеряются в логитах. Результаты измерения в обобщенном виде представлены ниже на (рис. 1).

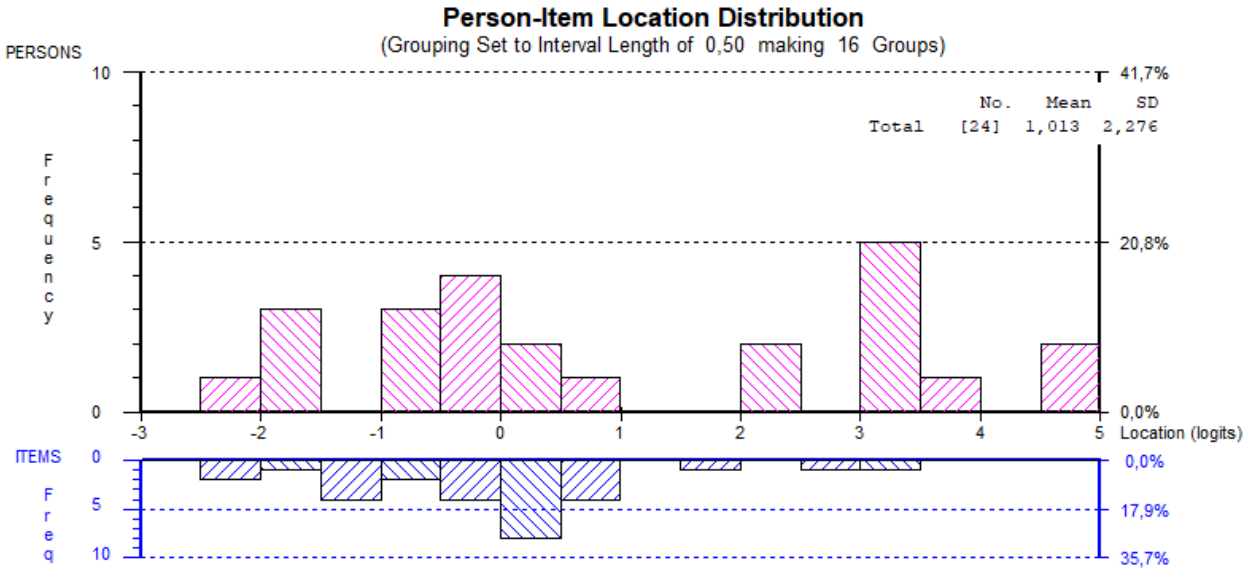

Рис. 1. Результаты измерения латентной переменной «успеваемость студентов»

Fig. 1. Results of measurement of the latent variable "students' academic performance"

В верхней части рисунка 1 на шкале латентной переменной представлено распределение оценок успеваемости студентов (в логитах), в нижней части – распределение оценок учебных дисциплин на той же шкале.

Полученные результаты измерения свидетельствуют о следующем.

1. Успеваемость студентов варьируется в очень большом диапазоне (от –2,5 до +5,0 логит). Это свидетельствует о большом различии студентов по успеваемости.

2. Оценки учебных дисциплин (их место расположение на шкале латентной переменной) также варьируются в большом диапазоне (от –2,0 до +3,5 логит). Это обеспечивает высокую точность измерения латентной переменной на всем диапазоне ее варьирования.

3. Между оценками студентов и учебными дисциплинами существует смещение, равное 1,013 логита. Это свидетельствует о том, что успеваемость студентов несколько превышает тот уровень, который предполагают учебные дисциплины.

В таблице 1 приведены оценки учебных дисциплин на шкале латентной переменной «успеваемость студентов».

Как видно из таблицы 1, наиболее «легкой» учебной дисциплиной оказалась «Психология-1», которая читается на первом курсе, оценка этой учебной дисциплины равна –3,951 логита. В рамках теории латентных переменных учебная дисциплина как индикаторная переменная полностью определяется ее характеристической кривой. Характеристическая кривая этой учебной дисциплины представлена ниже (рис. 2).

Рисунок с характеристической кривой имеют следующую структуру.

На оси абсцисс показаны значения латентной переменной, в данном случае это «успеваемость студентов». Эта латентная переменная, как и любые другие латентные переменные в рамках теории латентных переменных, измеряется в логитах. На оси ординат показаны значения рассматриваемого индикатора – учебной дисциплины. В диалоговой системе RUMM значение любого индикатора начинается с «0». В данном случае значение индикатора «0» соответствует оценке «удовлетворительно» по рассматриваемой дисциплине «Психология», значение «1» соответствует оценке «хорошо» и «3» – оценке «отлично». Точками на рисунке 2 показаны средние значения латентной переменной для студентов с низким, средним и высоким уровнем подготовленности по этой дисциплине.

Таблица 1. Оценки учебных дисциплин как индикаторов

Table 1. Assessment of academic disciplines as indicators

№ п/п	Курс	Учебная дисциплина	Оценка, логит	Стандартная ошибка, логит
1	1	Психология-1	–3,951	0,585
2	1	История	–3,805	0,591
3	1	Математический анализ-1	–3,772	0,582
4	1	Алгебра-1	–3,534	0,632
5	1	Геометрия-1	–1,039	0,555
6	1	Математический анализ-2	–0,952	0,565
7	1	Педагогика-1	–0,583	0,441
8	1	Программирование	–0,553	0,463
9	2	Психология-2	–0,413	0,546
10	2	Алгебра-2	0,027	0,512
11	2	Геометрия-2	0,358	0,480
12	2	Операционные системы, сети и интернет-технологии	0,447	0,487
13	2	Методика обучения математике и информатике-1	0,448	0,439
14	2	Математический анализ-3	0,458	0,432
15	2	Педагогика-2	0,502	0,431
16	2	Философия	0,605	0,454
17	3	Теоретические основы информатики	0,713	0,491
18	3	Теория функций действительного переменного	0,920	0,472
19	3	Теория алгоритмов	0,966	0,431
20	3	Методика обучения математике и информатике	0,979	0,434
21	3	Теория функций комплексного переменного	0,983	0,448
22	3	Методика обучения математике и информатике-2	1,077	0,496
23	3	Теория вероятностей и математическая статистика	1,322	0,446
24	4	Информационные системы	1,511	0,455
25	4	Методика обучения математике и информатике-3	1,732	0,472
26	4	Дифференциальные уравнения	2,423	0,458
27	4	Основы искусственного интеллекта	3,131	0,484

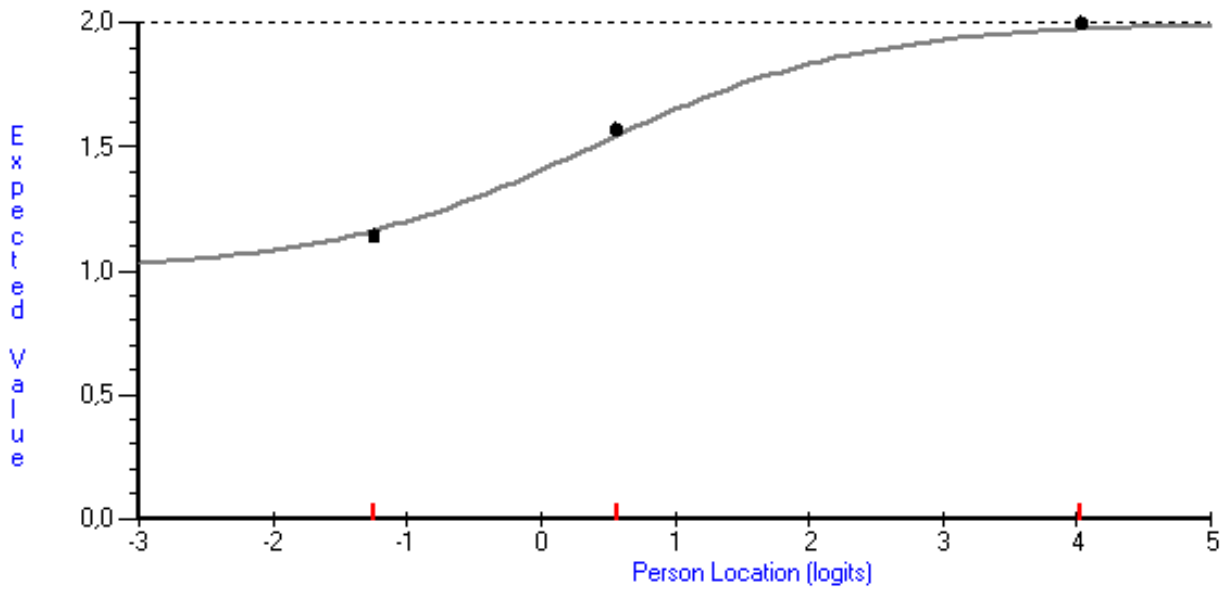

Рис. 2. Характеристическая кривая учебной дисциплины «Психология-1»

Fig. 2. Characteristic curve of the discipline "Psychology-1"

Эта характеристическая кривая имеет наибольшую крутизну в левой части шкалы. Это означает, что «Психология-1» лучше других дифференцирует студентов с низкой успеваемостью.

Наиболее трудной учебной дисциплиной является «Основы искусственного интеллекта» с оценкой 3,131 логита (рис. 3).

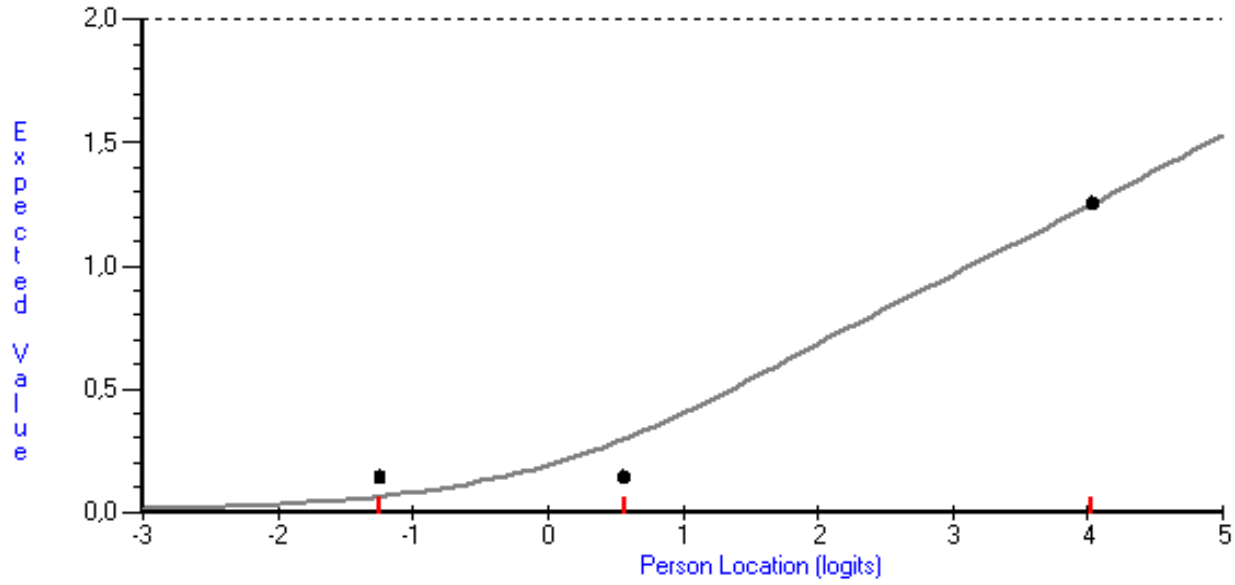

Рис. 3. Характеристическая кривая учебной дисциплины «Основы искусственного интеллекта»

Fig. 3. Characteristic curve of the academic discipline "Fundamentals of artificial intelligence"

Трудность учебной дисциплины «Основы искусственного интеллекта» иллюстрируется тем, что характеристическая кривая располагается гораздо ниже (меньшая успеваемость) по сравнению с кривой для учебной дисциплины «Психология-1». Кроме того, наибольшая крутизна этой кривой находится в правой части шкалы. Это означает, что учебная дисциплина «Основы искусственного интеллекта» лучше других дифференцирует студентов с высокой успеваемостью.

Оценки студентов (в логитах) представлены ниже (табл. 2).

Таблица 2. Успеваемость академической группы студентов в логитах

Table 2. Academic performance of students in logits

№	Пол	Курс1	Курс2	Курс3	Курс4
1	Ж	0,836	0,697	1,917	–0,023
2	М	–0,355	–0,116	1,194	3,164
3	М	–1,188	–1,493	–3,294	–4,159
4	Ж	7,270	4,124	2,569	–3,070
5	Ж	4,063	4,124	5,736	7,132
6	М	6,176	3,249	4,734	5,357
7	М	0,285	0,697	0,366	3,164
8	Ж	0,836	–0,984	–1,132	–3,070
9	М	1,357	0,291	–0,438	–0,023
10	Ж	–2,246	0,291	1,194	3,164
11	Ж	5,108	2,586	3,902	3,164
12	Ж	–1,188	–2,119	–3,294	–5,454
13	М	5,108	3,249	4,734	7,132
14	Ж	7,270	5,280	5,736	7,132
15	Ж	0,836	0,697	3,902	3,164
16	Ж	7,270	5,280	5,736	7,132
17	Ж	0,836	–0,116	–1,132	–4,159
18	Ж	5,108	3,249	5,736	7,132
19	М	–0,355	–0,984	–7,093	–4,159
20	Ж	4,063	5,280	5,736	7,132
21	Ж	4,063	5,280	5,736	5,357
22	М	–2,246	–1,493	–1,784	–0,023
23	Ж	–0,355	0,291	1,194	3,164
24	Ж	0,285	0,697	–1,784	–5,454

Из таблицы 2 видно, что успеваемость студентов в рамках теории латентных переменных дифференцируется в очень широких пределах. Корреляционный анализ показал, что статистические взаимосвязи между курсами достаточно высокие. Все парные коэффициенты корреляции более 0,7.

Успеваемость студентов исследовалась в зависимости от двух факторов – пола и курса обучения студента. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты дисперсионного анализа успеваемости студентов

Table 3. The results of variance analysis of student performance

Источник дисперсии	Сумма квадратов	Степень свободы	Средний квадрат	F	p
Пол	63,94	1,00	63,94	5,28	0,024
Курс	7,15	3,00	2,38	0,20	0,898
Взаимодействие Пол X Курс	11,65	3,00	3,88	0,32	0,810
Ошибка	1064,81	88,00	12,10		
Всего	1145,74	95			

Проинтерпретируем полученные результаты дисперсионного анализа (см. табл. 3):

1. Фактор «пол» значим ($p = 0,024 < 0,05$). Это означает, что девушки и юноши статистически значимо отличаются друг от друга в среднем по всем курсам обучения. Соответствующие оценки приведены в таблице 4.

Таблица 4. Оценки успеваемости девушек и юношей

Table 4. Assessment of academic performance of girls and boys

Пол	Оценка успеваемости, логит	Стандартная ошибка, логит	95% доверительный интервал	
			нижняя граница	верхняя граница
Девушки	2,389	0,435	1,525	3,253
Юноши	0,658	0,615	-0,564	1,880

2. Фактор «курс» незначим ($p = 0,898 > 0,05$). Тем не менее представляют интерес средние оценки успеваемости студентов по курсам, это необходимо для целей мониторинга. Соответствующие средние приведены в таблице 5.

Таблица 5. Оценки успеваемости студентов в зависимости от курса

Table 5. Assessment of students' academic performance depending on the grade

Курс	Оценка успеваемости, логит	Стандартная ошибка, логит	95% доверительный интервал	
			нижняя граница	верхняя граница
Первый	1,926	0,753	0,429	3,422
Второй	1,296	0,753	-0,201	2,792
Третий	1,206	0,753	-0,291	2,703
Четвертый	1,667	0,753	0,170	3,164

Из таблицы 4 видно, что успеваемость у студентов выше всего на первом курсе (1,926 логита). На втором и третьем курсам успеваемость несколько ниже (1,296 логита и 1,206 логита соответственно). На четвертом курсе успеваемость повышается (1,667 логита). Однако необходимо отметить, что эти различия статистически незначимы.

3. Взаимодействие факторов «пол» и «курс» статистически незначимо ($p = 0,810 > 0,05$). Это означает, что эффекты уровней одного фактора не зависят от эффектов уровней другого фактора и полученные ранее выводы справедливы для всех уровней рассматриваемых факторов.

Выводы

Показаны целесообразность и возможность применения теории латентных переменных для статистического анализа успеваемости студентов. В рамках этой теории успеваемость студентов рассматривается как латентная переменная, индикаторами которой являются учебные дисциплины. Определено местоположение учебных дисциплин на шкале успеваемость студентов. Наиболее легкой оказалась дисциплина «Психология», которая читается на первом курсе, наиболее трудной – дисциплина «Основы искусственного интеллекта», которая читается на четвертом курсе. Успеваемость студентов дифференцируется в гораздо большей степени, чем при четырехбалльной системе оценивания. Кроме того, успеваемость студентов измеряется на линейной шкале в логитах, что позволяет использовать широкий класс статистических процедур для их анализа. Проведенный мониторинг показал, что нет статистически значимого различия по успеваемости студентов в 2016–2019 гг. В среднем по всем годам успеваемость девушек оказалась статистически значимо выше успеваемости юношей.

Список литературы

1. Matošková J., Kovářík M. Development of a situational judgment test as a predictor of college student performance // Journal of Psychoeducational Assessment. 2016. Vol. 35(8). P. 768–784.

2. Baichang Zhong, Tingting Li. Can pair learning improve students' troubleshooting performance in robotics education? // Journal of Educational Computing Research. 2019. Vol. 58(1). P. 220–248.

3. Hill H. C., Chin M.. Connections between teachers' knowledge of students, instruction, and achievement outcomes // American Educational Research Journal. 2018. Vol. 55(5). P. 1076–1112.

4. Маслак А. А., Рыбкин А. Д. Анализ качества опросника для измерения на линейной шкале любознательности школьников // Педагогическое образование в России. 2014. № 12. С. 158–165.

5. Маслак А. А., Поздняков С. А. Анализ качества тестовых заданий с выбором одного правильного ответа: методичические рекомендации рекомендации. Славянск-на-Кубани: Изд. центр СГПИ, 2009. 50 с.

6. Дроздов В. И., Маслак А. А., Новиков Ю. М. Использование современной теории тестологии при оценке качества АПИМ // Известия Курского государственного технического университета. 2008. № 4 (25). С. 87–95.

7. Оценка влияния частично правильных ответов учащихся на точность измерения уровня их подготовленности / А. А. Маслак, С. А. Осипов, М. М. Алиакпарова, С. А. Филист // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 2, ч. 2. С. 76–87.

8. Исследование точности измерения латентной переменной в зависимости от числа градаций индикаторных переменных / Т. С. Анисимова, А. А. Маслак, С. А. Осипов, С. А. Поздняков // Теория и практика измерения латентных переменных в образовании: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции. Славянск-на-Кубани: Изд. центр СГПИ, 2005. С. 12–21.

9. Данилов А. А., Маслак А. А. Исследование точности измерения латентной переменной в зависимости от числа градаций индикаторных переменных // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5, № 11. С. 106–114.

10. Маслак А. А., Поздняков С. А. Измерение качества выпускных квалификационных работ: методические рекомендации. Славянск-на-Кубани: Изд. центр СГПИ, 2009. 47 с.

11. Маслак А. А., Леус О. В., Данилов А. А. Разработка методики измерения качества образования в школе: методические рекомендации. Славянск-на-Кубани: Изд. центр СГПИ, 2009. 68 с.

12. Оценка качества опросника для измерения латентной переменной «толерантность» / А. А. Маслак, Т. С. Анисимова, С. А. Осипов, А. И. Давлетова // Оценка эффективности образовательных инноваций и технологий: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. Славянск-на-Кубани: Изд. центр СГПИ, 2004. С. 25–35.

13. Маслак А. А. Теория и практика измерения латентных переменных в образовании: монография. М.: Юрайт, 2016. 255 с.

14. Маслак А. А., Анисимова Т. С. Эксперимент в образовании как средство повышения его качества (многофакторный многомерный подход). М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2001. 66 с.

15. Педагогические измерения. Тезаурус / В. С. Аванесов, Т. С. Анисимова, А. А. Маслак, О. А. Семенцова, Г. И. Смирнова // Педагогические измерения. 2005. № 1. С. 28–32.

16. Маслак А. А., Моисеев С. И., Осипов С. А. Сравнительный анализ оценок параметров модели Раша, полученных методами максимального правдоподобия и наименьших квадратов // Проблемы управления. 2015. № 5. С. 58–66.

17. LeBeau B., Assouline S. G., Mahatmya D., Lupkowski-Shoplik A. Differentiating among high-achieving learners: a comparison of classical test theory and item response theory on above-level testing // Gifted Child Quarterly. 2020. Vol. 64(3). P. 219–237.

18. Vahid Aryadoust, Limei Zhang. Fitting the mixed Rasch model to a reading comprehension test: Exploring individual difference profiles in L2 reading // Language Testing. 2015. Vol. 33(4). P. 529–553.

19. Getting started RUMM 2010. Rasch unidimensional measurement models. Pert: RUMM Laboratory Ltd, 2001. 87 p.

References

1. Matošková J., Kovářík M. Development of a Situational Judgment Test as a Predictor of College Student Performance. *Journal of Psychoeducational Assessment*, 2016, vol. 35(8), pp. 768–784.

2. Baichang Zhong, Tingting Li. Can pair learning improve students' troubleshooting performance in robotics education? *Journal of Educational Computing Research*, 2019, vol. 58(1), pp. 220–248.

3. Hill H. C., Chin M.. Connections between teachers' knowledge of students, instruction, and achievement outcomes. *American Educational Research Journal*, 2018, vol. 55(5), pp. 1076–1112.

4. Maslak A. A., Rybkin A. D. Analiz kachestva oprosnika dlya izmereniya na lineinoi shkale lyuboznatel'nosti shkol'nikov [Analysis of the quality of the questionnaire for measuring on a linear scale schoolchildren' curiosity]. *Pedagogicheskoe obrazovanie v Rossii = Pedagogical Education in Russia*, 2014, no. 12, pp. 158–165. (In Russ.)

5. Maslak A. A., Pozdnyakov S. A. Analiz kachestva testovykh zadanii s vyborom odnogo pravil'nogo otveta [Analysis of the quality of test tasks with the choice of one correct answer]. Slavyansk-on-Kuban, SSPI Publ. Center, 2009. 50 p. (In Russ.)

6. Drozdov V. I., Maslak A. A., Novikov Yu. M. Ispol'zovanie sovremennoi teorii testologii pri otsenke kachestva APIM [Using the modern theory of testology in assessing the quality of APIM]. *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of the Kursk State Technical University*, 2008, no. 4 (25), pp. 87–95. (In Russ.)

7. Maslak A. A., Osipov S. A., Aliakparova M. M., Filist S. A. Otsenka vliyaniya chastichno pravil'nykh otvetov uchashchikhsya na tochnost' izmereniya urovnya ikh podgotovlennosti [Evaluation of the influence of partially correct answers of students on the precision of measuring the level of their performance]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 2, pt. 2, pp. 76–87. (In Russ.)

8. Anisimova T. S., Maslak A. A., Osipov S. A., Pozdnyakov S. A. Issledovanie tochnosti izmereniya latentnoi peremennoi v zavisimosti ot chisla gradatsii indikatornykh peremennykh [Investigation of the precision of measuring a latent variable depending on the number of gradations of indicators]. Teoriya i praktika izmereniya latentnykh peremennykh v obrazovanii: materialy VII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Theory and practice of measuring latent variables in education. Materials of the Seventh all-Russian scientific and practical conference]. Slavyansk-on-Kuban, SSPI Publ. Center, 2005, pp. 12–21. (In Russ.)

9. Danilov A. A., Maslak A. A. Issledovanie tochnosti izmereniya latentnoi peremennoi v zavisimosti ot chisla gradatsii indikatornykh peremennykh [Investigation of the precision of measuring a latent variable depending on the number of gradations of indicators]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of the Voronezh State University*, 2009, vol. 5, no. 11, pp. 106–114. (In Russ.)

10. Maslak A. A., Pozdnyakov S. A. Izmerenie kachestva vypusknykh kvalifikatsionnykh rabot [Measuring the quality of final qualification papers]. Slavyansk-on-Kuban, Publ. House of the Center of SSPI, 2009. 47 p. (In Russ.)

11. Maslak A. A., Leus O. V., Danilov A. A. Razrabotka metodiki izmereniya kachestva obrazovaniya v shkole [Development of methods for measuring the quality of education in school]. Slavyansk-on-Kuban, Publ. House of the Center of SSPI, 2009. 68 p. (In Russ.)

12. Maslak A. A., Anisimova T. S., Osipov S. A., Davletova A. I. [Evaluation of the quality of the questionnaire for measuring the latent variable "tolerance"]. Otsenka effektivnosti obrazovatel'nykh innovatsii i tekhnologii. Materialy VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Evaluation of the effectiveness of educational innovations and technologies. Materials of the Sixth all-Russian scientific and practical conference]. Slavyansk-on-Kuban, SSPI Publ. Center, 2004, pp. 25–35. (In Russ.)

13. Maslak A. A. Teoriya i praktika izmereniya latentnykh peremennykh v obrazovanii [Theory and practice of measuring latent variables in education]. Moscow, Yurait Publ., 2016. 255 p. (In Russ.)

14. Maslak A. A., Anisimova T. S. Eksperiment v obrazovanii kak sredstvo povysheniya ego kachestva (mnogofaktornyi mnogomernyi podkhod) [Experiment in education as a means of improving its quality (multivariate multidimensional approach)]. Moscow, Research Center for quality problems of training specialists, 2001. 66 p. (In Russ.)

15. Avanesov V. S., Anisimova T. S., Maslak A. A., Sementsova O. A., Smirnova G. I. Pedagogicheskie izmereniya. Tezaurus [Pedagogical measurements. Thesaurus]. *Pedagogicheskie izmereniya = Pedagogical measurements*, 2005, no. 1, pp. 28–32. (In Russ.)

16. Maslak A. A., Moiseev S. I., Osipov S. A. Sravnitel'nyi analiz otsenok parametrov modeli Rasha, poluchennykh metodami maksimal'nogo pravdopodobiya i naimen'shikh kvadratov [Comparative analysis of estimates of the parameters of the Rasch model obtained by the methods of maximum likelihood and least squares]. *Problemy upravleniya = Management Issues*, 2015, no. 5, pp. 58–66. (In Russ.)

17. LeBeau B., Assouline S. G., Mahatmya D., Lupkowski-Shoplik A. Differentiating among high-achieving learners: a comparison of classical test theory and item response theory on above-level testing. *Gifted Child Quarterly*, 2020, vol. 64(3), pp. 219–237.

18. Vahid Aryadoust, Limei Zhang. Fitting the mixed Rasch model to a reading comprehension test: Exploring individual difference profiles in L2 reading. *Language Testing*, 2015, vol. 33(4), pp. 529–553.

19. Getting Started RUMM 2010. Rasch Unidimensional Measurement Models. Pert, RUMM Laboratory Ltd, 2001. 87 p.

Информация об авторе / Information about the Author

Маслак Анатолий Андреевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры математики, информатики, естественно-научных и общетехнических дисциплин, филиал ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», г. Славянск-на-Кубани, Российская Федерация, e-mail: anatoliy_maslak@mail.ru

Anatoly A. Maslak, Dr. of Sci. (Engineering) Professor, Professor of the Department of Mathematics, Computer Science, Natural Science and General Technical Disciplines, Branch of the Kuban State University, Slavyansk-on-Kuban, Russian Federation, e-mail: anatoliy_maslak@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.932

Автоматизация учебного процесса вуза для аккредитации

А. Л. Лисицин[1], А. Л. Лисицин[2], Л. А. Лисицин[1] ✉

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

[2] Курский государственный университет
ул. Радищева 33, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: leo_263@mail.ru

Резюме

Цель исследования. *Окружающий мир состоит из систем: естественных и искусственных, созданных человеком. Искусственные системы усложняются по мере развития общества. Для работы в этих системах предъявляются высокие требования к качеству и уровню высшего образования исследователей. В подобных условиях сам процесс получения образования является очень сложной и динамичной системой, кардинально изменяющейся в течение учебного года. Это создаёт значительные трудности в образовательной среде и требует глубокого осмысления всех протекающих процессов для эффективного поиска решения возникающих проблем.*

В век информационных технологий наукоемкая интеллектуальная продукция (информационный продукт) развитых стран составляет до 80% от всего объема денежной массы рынка. Это означает, что большая часть трудоспособного населения развитых стран занята в сфере информационных технологий, которые получают нужное образование в вузах.

Информационный продукт для рынка, и для вуза в том числе, требует документального подхода для своего оформления. Структурирование данных, прозрачность для проверки, доступность для понимания, последовательность в изложении, привязка к стандартам, безошибочность, подготовка в срок – это неполный список требований, который накладывает дополнительную нагрузку на преподавателей вуза, делая их специалистами в системе документооборота.

Методы. *Для увеличения производительности преподавателя при создании документов учебного процесса применимы офисные технологии на базе широко распространенного программного обеспечения MS OFFISE (любой модификации). При помощи макрос в EXCEL создается программный робот, который связывает документ с данными, например учебный план, с шаблоном оформления документа, например рабочей программы (РП).*

Результаты. *Внедрение программного робота позволяет сократить время создания РП минимум в 5 раз, а также сократить время для сторонней проверки, а в большинстве случаев исключает данную проверку за счет высокой точности работы. При увеличении количества создаваемых РП время создания еще больше сокращается благодаря повторяющимся данных и выработке определенных навыков.*

Заключение. *В программном роботе подобного рода нуждаются тысячи преподавателей в России и за рубежом.*

Ключевые слова: *аккредитация вуза; автоматизация учебного процесса; рабочая программа; учебно-методический комплекс.*

© Лисицин А. Л., Лисицин А. Л., Лисицин Л. А., 2020

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

Для цитирования: Лисицин А. Л., Лисицин А. Л., Лисицин Л. А. Автоматизация учебного процесса вуза для аккредитации // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 90–101.

Поступила в редакцию 08.09.2020 *Подписана в печать 14.10.2020* *Опубликована 30.11.2020*

Automation of the Educational Process of the University for Accreditation

Alexey L. Lisitsin[1], Alexander L. Lisitsin[2], Leonid A. Lisitsin[1]✉

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

[2] Kursk State University
33 Radischeva str., Kursk 305000, Russian Federation

✉ e-mail: leo_263@mail.ru

Abstract

Purpose of research. *The world around us consists of systems: natural and artificial, created by man. Artificial systems become more complex as society develops. Higher education is required to operate in these systems. In such conditions, the educational process itself has become a very complex and dynamic system, cardinally changing during the school year. This creates a lot of difficulties in the educational environment and requires a deep understanding of all the ongoing processes to effectively find solutions to emerging problems.*
In the age of information technology, high-tech intellectual products (information product) of developed countries make up 80% of the total money supply of the market. This means that most of the able-bodied population of developed countries is engaged in the field of information technology, which receive the necessary education in universities.
An information product for the market, and for a university as well, requires a documentary approach for its design. Structuring data, transparency for verification, accessibility to understanding, consistency in presentation, alignment with standards, accuracy, preparation on time - this is an incomplete list of requirements that imposes an additional burden on university teachers, making them specialists in the workflow system.
***Methods**. In order to increase the teacher's productivity when creating documents of the educational process, we will apply office technologies based on the widely used MS OFFISE software (any modification). Using a macro in EXCEL, a software robot is created that associates a document with data, such as a curriculum, with a document design template, such as a work program (RP).*
Results. *The introduction of a software robot allows you to reduce the time of creating RPs by at least 5 times, as well as reduce the time for third-party verification, and in most cases eliminates this verification due to high accuracy. With an increase in the number of created RPs, the creation time is further reduced due to repeated data and the development of certain skills.*
***Conclusion**. Thousands of teachers in Russia and abroad need this kind of software robot.*

Keywords: *university accreditation; automation of the educational process; work program; educational and methodical complex*

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

For citation: Lisitsin A. L., Lisitsin A. L., Lisitsin L. A. Automation of the Educational Process of the University for Accreditation. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(3/4): 90–101. (In Russ.)

Received 08.09.2020 *Accepted 14.10.2020* *Published 30.11.2020*

***

Введение

Одной из проблем быстрых изменений в образовательной среде является внедрение в России Болонского процесса [1]. Для получения лицензии учебного заведения (в данном случае – вуза) требуется государственная аккредитация, которая продлевается раз в пять лет. Новые специальности, или открытые филиалы, проходят аккредитацию только после первого выпуска. Сертификат об успешно пройденной аккредитации дает право на получение льгот (отсрочка от армии, обучение на бюджете), что в свою очередь привлекает абитуриентов и помимо служит гарантией качественного обучения. Проверка проходит с помощью Национального аккредитационного агентства [2; 3], которое подтверждает качество образования путем проведения экспертизы знаний студентов и преподавателей, а также проверки всей документации учебного процесса. Неаттестованный вуз (или отдельная специальность) имеет право пройти аккредитацию повторно через год после устранения недостатков.

В случае с вузами оформление образовательной документации – это есть создание *информационного интеллектуального продукта* [4]. К его оформлению, как к документу, предъявляются самые строгие требования: форма, наполнение, соответствие стандартам и временным рамкам. Из-за большого количества данных возможны ошибки даже в простом переписывании из одной таблицы в другую. Порой одна досадная ошибка портит весь документ или всю работу коллектива. При этом улучшение и обновление становятся обычным делом, а это ведет к перегрузке преподавателей и инженерных работников, что является *второй* главной проблемой образования [5], потому как отвлекает персонал от основной учебной деятельности и самообразования.

Если учитывать изменения в экономиках индустриального и информационного периодов развития общества [6], то можно заметить некоторые похожие закономерности: и в том и другом случаях постоянно требуется увеличение производительности труда. В кризисный период это удалось сделать с помощью автоматизированных систем управления [7; 8], когда автоматы и роботы заменили людей на трудных промышленных участках и смогли работать в 3 смены без брака.

Существующие программы документооборота на сегодняшний день не пригодны для формирования динамично меняющихся небольших документов. Они требуют настройки, сопровождения и обучения, дорогие в эксплуатации. Разработчики их делают многофункциональными, отчасти для повышения себестоимости. Это программы «Дело» [9], «Евфрат» [10], «Бюрократ» [11], «1С:Документооборот 8» [12] и др.

Материалы и методы

Разработка учебно-методических комплексов (УМК) является основной документацией учебного процесса и затрагивает большое число работников. Рабочая программа должна быть согласована с учебным планом, и на её основе разрабатываются фонд оценочных средств (вопросы, билеты к зачету и экзаменам), лекции и методические указания к лабораторным и практическим занятиям [13]. Поэтому важной задачей становится *автоматизация учебного процесса вуза.*

По экспертным оценкам, при проверке РП более 80% ошибок приходится на рутинную работу [14]: перенос данных из учебных планов в РП, указание неверных дат, оформление таблиц, указание формата текста и другое. Каждый преподаватель создает обычно 10–20 программ по очному и заочному обучению, монотонная числовая информация часто путается. Однако её легко автоматизировать при помощи программы – робота. Для этого можно напрямую из учебного плана сформировать отформатированный шаблон в WORD [15] будущей РП, вписав в неё все данные, кроме названия тем по дисциплине, литературы и практических занятий (их впишет сам преподаватель на последнем этапе).

Для построения модели УМК дисциплины рекомендуется сделать её в приложении EXCEL [15], для чего перенести все основные данные из учебного плана, что сделать проще, так как учебный план тоже формируется в данном приложении. Затем по заданным шаблонам [16] РП, аннотации [17] и фонда оценочных средств (ФОС) сформировать на основе модели УМК выходные документы в автоматическом режиме.

Суть метода заключается в формировании особой строки данных для каждой РП (рис. 1). В зависимости от назначения данные делят на входные, которые изначально прописаны учебным планом, и формируемые, которые преподаватель создает сам на основе входных данных и выбранной литературы. Для удобства первая строка отводится под метки для программы-робота (написанной в виде макроса [18; 19; 20]), а вторая выделяется цветом и подписывается в виде шапки-таблицы параметров.

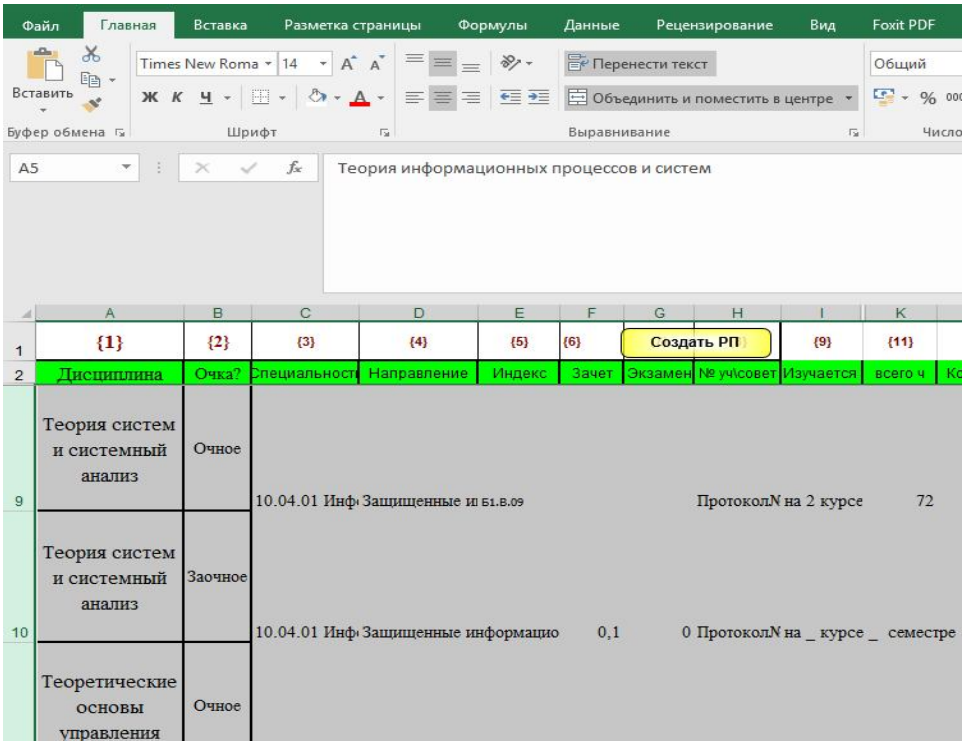

Рис. 1. Формирование строк данных

Fig. 1. Formation of data lines

Алгоритм работы программы [21]: создается новый каталог для работы с указанием текущей даты и времени, по названию первой ячейки в строке создается новый файл РП (или аннотации), переносятся все пронумерованные ячейки строки из EXCEL в пронумерованные ячейки шаблона WORD РП. По достижении последней рабочей строки программа заканчивает работу и выводит сообщение о количестве созданных файлов.

Результаты и их обсуждение

Благодаря структуризации некоторые данные заполняются простым копированием соседних ячеек, например, направление дисциплины, даты протоколов утверждения программ, а также одинаковые компетенции и прочее. Это значительно сокращает время заполнения данных. Комбинации различных функций EXCEL позволяют многие данные из учебных планов формировать автоматически. Строку данных можно дополнять новыми позициями.

При наборе нескольких РП позиции строк и столбцов можно скрывать для большей наглядности набора данных и удобства.

Одну и ту же строку данных можно использовать для разных шаблонов документов: рабочей программы дисциплины, аннотации, ФОС и программы практики, т. е. *программа – робот – универсальна*.

После набора данных и ввода меток в шаблон (рис. 2) макрос формирует папку, в которой автоматически создает

файлы рабочих программ. Время автоматического формирования 20 РП на среднем офисном компьютере – около 3 мин. Если перезапустить макрос снова, то создается новая папка с новым временем создания файлов, предыдущая не уничтожается. Данный подход позволяет быстро просматривать результаты работы и корректировать ошибки.

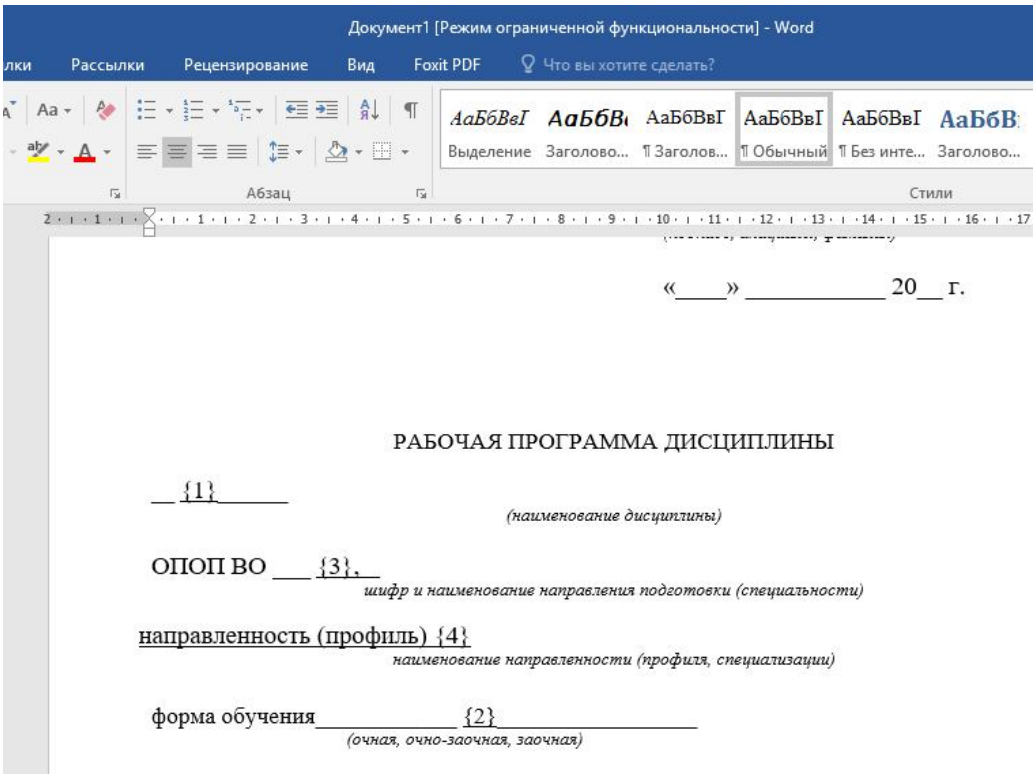

Рис. 2. Шаблон рабочей программы с метками

Fig. 2. Work program template with labels

Экспериментально подтвердим или опровергнем мнение экспертов о большом количестве ошибок во входных данных. Для этого посчитаем отношения входных параметров к выходным. Для эксперимента возьмем количество всех параметров 125 и посчитаем отношение входных и выходных параметров. При этом следует учесть, что выходные параметры часто не выражаются численно, а значит, их допуски для РП вовсе не критичны или должны оцениваться другими критериями, не имеющими отношения к оформлению. Входных параметров оказалось 82, т. е. тех параметров, которые мы будем вводить автоматически (название дисциплины, направления, код специальности, часы контактной работы, лабораторных работ, лекций, самостоятельной работы, код и наименование компетенций и т. д). Отношение составило 67%. Но эксперты считают ошибкой неверное форматирование текста, заполнение таблиц, ошибки в

тексте в документе, поэтому 80% ошибок вполне реально.

Попробуем также экспериментально просчитать загрузку преподавателя на переделку одной программы. Для поиска и ввода 82 входных параметров на каждый параметр отведем в среднем 3 минуты, хотя реально показатель может быть и 5 минут. Итого получим 4 часа непрерывной кропотливой работы на 1 программу: найти действующий рабочий учебный план, найти нужные строки в нем, синхронизировать шапку таблицы с данными, выписать их отдельной строкой в файле, провести сверку по компетенциям и т. д.). Выходные параметры (формирование индикаторов компетенций, ввод литературы, методических указаний, тем занятий и прочее), если они уже разработаны и готовы к вводу, займут не менее 5 минут для ввода на один показатель, это еще 4 часа непрерывной работы (это минимальный показатель, потому как на формирование таблиц РП тратится времени в разы больше), т. е. получается на оформление по готовым данным без отвлечений преподаватель тратит более 2-х дней на РП. А если разрабатывать методические указания, лекции, ФОС, то это сроки в неделях.

При закреплении за каждым преподавателем 15-ти РП реальное время оформления будет больше месяца. А ведь еще существует основная работа по проведению занятий, просто текущая работа в семестре и т. д. При помощи автоматизации процесса этот срок может значительно сократиться на всю работу, связанную с оформлением всех программ. Основную часть времени все-таки придется тратить на заполнение данными строки РП в EXCEL. Однако в EXCEL это можно сделать автоматически с помощью формул, т. е. это ввод 82-х параметров входных данных из 125 всех параметров.

Выводы

Достоинства метода формирования РП состоит в следующем:

– простота работы по данному методу не требует какого-либо дополнительного обучения;

– подготовкой модели УМК до 80% может заниматься практически один человек на кафедре с использованием программы-робота;

– проверка УМК после программы робота или не требуется, или упрощается многократно, используя математический аппарат EXCEL;

– работа преподавателя на оформление учебной документации значительно сократится, и останется только профессиональная, творческая её часть, связанная с формированием тем лекционных, практических или лабораторных работ, поиском доступной современной литературы по дисциплине, созданием методических указаний и формированием вопросов для зачета или экзамена;

– в случае изменения рабочих планов (что происходит неоднократно за учебный год) или шаблонов документов

переоформление РП не составит труда даже без самого преподавателя инженерными работниками кафедр;

– информацию легко структурировать (добавляются новые строки, новые файлы, новые шаблоны или удаляются);

– возможна параллельная коллективная удаленная работа при наборе данных;

– программа будет работать с любым частичным набором данных, т. е. невведенные данные будут равны 0);

– текст в шаблоне легко форматируется простым форматом метки;

– макрос легко переносится на любую версию EXCEL;

– возможна непрерывная модернизация по желанию пользователя;

– программа легко адаптируется к зарубежным учебным учреждениям;

– сохранение РП, ФОС и аннотаций возможна как в формате MS Word, так и в формате .pdf.

Список литературы

1. Болонский процесс. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BD%D1%8C%D1%8F (дата обращения: 16.05.2020).

2. Федеральная служба по надзору в сфере образования и науки. URL: http://obrnadzor.gov.ru/ ru/activity/public_services/accreditation/ (дата обращения: 14.05.2020).

3. Положение о государственной аккредитации высшего учебного заведения: [утв. Постановлением Правительства РФ от 2 декабря 1999 г. № 1323; с изменениями и дополнениями от 1 февраля 2005 г.]. URL: https://base.garant.ru/181268/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/ (дата обращения: 11.06.2020).

4. Интеллектуальный капитал. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%83%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BA%D0%B0%D0%BF%D0%B8%D1%82%D0%B0%D0%BB (дата обращения: 11.06.2020).

5. О проблемах современного образования. URL: https://trizway.com/art/form/problemy-sovremennogo-obrazovaniya.html (дата обращения: 14.05.2020).

6. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года. URL: http://static.government.ru/media/files/41d457592e04b76338b7.pdf (дата обращения: 11.05.2020).

7. Автоматизированные системы управления. URL: https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F&stable=1 (дата обращения: 14.05.2020).

8. Лисицин А. Л., Зотов И. В. Особенности автоматизации управления современными сложными системами с использованием систем логического управления // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2016. № 2. С. 35–38.

9. СЭД «ДЕЛО». URL: https://www.eos.ru/eos_products/eos_delo/ ?gclid= CjwKCAiAxKv_BRBdEiwAyd40N_pUPGX5qcvgrCgFTRFccMszoX-HF9eoJPalF7g GPPD4hDxeWYoa9RoCnn4QAvD_BwE (дата обращения: 20.05.2020).

10. СЭД «Евфрат». URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%92% D0% A4%D0%A0%D0%90%D0%A2 (дата обращения: 30.05.2020).

11. СЭД «Бюрократ». URL: http://burokratgroup.ru/ (дата обращения: 17.06.2020).

12. СЭД «1С:Документооборот 8». URL: https://v8.1c.ru/doc8/ (дата обращения: 18.06.2020).

13. Пакет Microsoft_Office. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Office (дата обращения: 11.05.2020).

14. Информация об описании образовательной программы. URL: https://swsu.ru/ sveden/education/eduOp/ (дата обращения: 16.05.2020).

15. Цифровизация компании. URL: https://ecm-journal.ru/post/Cifrovizacija-kompanii-K-chemu-privodjat-oshibki-v-dokumentakh.aspx (дата обращения: 10.05.2020).

16. Использование шаблона. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0% B8%D0%BA%D0%B8%D0%BF%D0%B5%D0%B4%D0%B8%D1%8F:%D0%A8%D0% B0%D0%B1%D0%BB%D0%BE%D0%BD%D1%8B (дата обращения: 18.05.2020).

17. Аннотация. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D0%BD% D0%BE%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F (дата обращения: 20.05.2020).

18. Автоматизация задач с помощью средства записи макросов – Excel. URL: https://support.microsoft.com/ru-ru/office/%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0% BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F-%D0% B7%D0%B0%D0%B4%D0%B0%D1%87-%D1%81-%D0%BF%D0%BE%D0%BC%D0% BE%D1%89%D1%8C%D1%8E-%D1%81%D1%80%D0%B5%D0%B4%D1%81%D1% 82%D0%B2%D0%B0-%D0%B7%D0%B0%D0%BF%D0%B8%D1%81%D0%B8%D0% BC%D0%B0%D0%BA%D1%80%D0%BE%D1%81%D0%BE%D0%B2-%E2%80%94-excel-974ef220-f716-4e01-b015-3ea70e64937b (дата обращения: 18.05.2020).

19. Макросы Excel для автоматизации. URL: https://exceltable.com/vba-macros/ (дата обращения: 10.05.2020).

20. Как написать макрос в Excel. URL: https://exceltable.com/vba-macros/kak-napisat-makros (дата обращения: 19.05.2020).

21. Алгоритм работы программы. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%BB%D0%BE%D0%BA%D1%81% D1%85%D0%B5%D0%BC%D0%B0 (дата обращения: 20.05.2020).

References

1. Bolonskii [Bologna process]. (In Russ.) Available at: https:// ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BD%D1%8C%D1%8F. (accessed 18.05.2020).

2. Federal'naya sluzhba po nadzoru v sfere obrazovaniya i nauki [Federal Service for Supervision of Education and Science]. (In Russ.) Available at: http:// obrnadzor.gov.ru/en/activity/public_services/accreditation/. (accessed 14.05.2020)

3. Polozhenie o gosudarstvennoi akkreditatsii vysshego uchebnogo zavedeniya. Utv. postanovleniem Pravitel'stva RF ot 2 dekabrya 1999 g. N 1323 [Regulations on State accreditation of higher educational institutions. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation of December 2, 1999 N 1323]. (In Russ.) Available at: https://base.garant.ru/181268/ 53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/. (accessed 11.06.2020)

4. Intellektual'nyi kapital [Intellectual capital]. (In Russ.) Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%83%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BA% D0%B0%D0%BF%D0%B8%D1%82%D0%B0%D0%BB. (accessed 11.06.2020)

5. O problemakh sovremennogo obrazovaniya [On the problems of modern education]. (In Russ.) Available at: https://trizway.com/art/form/ problemy-sovremennogo-obrazovaniya.html. (accessed 14.05.2020)

6. Prognoz dolgosrochnogo sotsial'no – ekonomicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda [Forecast of long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period up to 2030]. (In Russ.) Available at: http://static.government.ru/media/files/ 41d457592e04b76338b7.pdf. (accessed 11.05.2020)

7. Avtomatizirovannye sistemy upravleniya [Automated control systems]. (In Russ.) Available at: https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F&stable=1. (accessed 14.05.2020)

8. Lisitsin A. L., Zotov I. V. Osobennosti avtomatizatsii upravleniya sovre-mennymi slozhnymi sistemami s ispol'zovaniem sistem logicheskogo upravleniya [Features of automation of control of modern complex systems with the use of logical control 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, 2016, no. 2, pp. 35–38. (In Russ.)

9. SED «DELO» [SED "BUSINESS"]. (In Russ.) Available at: https://www.eos.ru/eos_products/eos_delo/?gclid=CjwKCAiAxKv_BRBdEiwAyd40N_pUPGX5qcvgrCgFTRFccMszoX-HF9eoJPalF7g GPPD4hDxeWYoa9RoCnn4QAvD_BwE (accessed 20.05.2020).

10. SED «Evfrat» [SED "Euphrates"]. (In Russ.) Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%92% D0% A4%D0%A0%D0%90%D0%A2 (accessed 30.05.2020)

11. SED «Byurokrat» [SED "Bureaucrat"]. (In Russ.) Available at: http:// burokrat-group.ru/. (accessed 17.06.2020)

12. SED «1S:Dokumentooborot 8» [SED "1C:Document Flow 8"]. (In Russ.) Available at: https://v8.1c.ru/doc8/. (accessed 18.06.2020)

13. Informatsiya ob opisanii obrazovatel'noi programmy [Information about the description of the educational program]. (In Russ.) Available at: https://swsu.ru / sveden/education/eduOp/. (accessed 16.05.2020)

14. Tsifrovizatsiya kompanii [Digitalization of the company]. (In Russ.) Available at: https://ecm-journal.ru/post/Cifrovizacija-kompanii-K-chemu-privodjat-oshibki-v-dokumentakh.aspx (accessed 10.05.2020)

15. Paket Microsoft_Office [Package Microsoft_Office]. (In Russ.) Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Office. (accessed 11.05.2020)

16. Ispol'zovanie shablona [Using the template]. (In Russ.) Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B8%D0%BA%D0%B8%D0%BF%D0% B5%D0%B4%D0%B8%D1%8F:%D0%A8%D0%B0%D0%B1%D0%BB%D0%BE%D0%BD%D1%8B. (accessed 18.05.2020).

17. Annotatsiya [Abstract]. (In Russ.) Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F. (accessed 20.05.2020)

18. Avtomatizatsiya zadach s pomoshch'yu sredstva zapisi makrosov – Excel [Automation of tasks with the help of the macro recording tool – Excel]. (In Russ.) Available at: https://support.microsoft.com/ru-ru/office/%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F-%D0%B7%D0%B0%D0%B4%D0%B0%D1%87-%D1%81-%D0%BF%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D1%89%D1%8C%D1%8E-%D1%81%D1%80%D0%B5%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0-%D0%B7%D0%B0%D0%BF%D0%B8%D1%81%D0%B8%D0%BC%D0%B0%D0%BA%D1%80%D0%BE%D1%81%D0%BE%D0%B2%E2%80%94-excel-974ef220-f716-4e01-b015-3ea70e64937b. (accessed 18.05.2020)

19. Makrosy Excel dlya avtomatizatsii [Excel macros for automation]. (In Russ.) Available at: https://exceltable.com/vba-macros/. (accessed 10.05.2020).

20. Kak napisat' makros v Excel [How to write a macro in Excel]. (In Russ.) Available at: https://exceltable.com/vba-macros/kak-napisat-makros. (accessed 19.05.2020)

21. Algoritm raboty programmy [The algorithm of the program]. (In Russ.) https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91% D0%BB%D0%BE%D0%BA%D1%81% D1%85% D0%B5%D0%BC%D0%B0 (accessed 20.05.2020)

Информация об авторах / Information about the Authors

Лисицин Алексей Леонидович, аспирант кафедры информационных систем и технологий, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: alex25lisitsyn@gmail.com

Лисицин Леонид Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: leo_263@mail.ru

Лисицин Александр Леонидович, ассистент кафедры информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Курский государственный университет»,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: vip.lisicin@mail.ru

Alexey L. Lisitsin, Post-Graduate Student of the Department Information Systems and Technologies of the Department, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: alex25lisitsyn@gmail.com

Leonid A. Lisitsin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department Information Systems and Technologies, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: leo_263@mail.ru,

Alexander L. Lisitsin, Assistant, Department of Information Security, Kursk State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: vip.lisicin@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 57.087

Прогнозирование возникновения, развития и донозологическая диагностика кожных болезней по энергетическому разбалансу меридианных структур организма

А. Л. Лукашов[1], Е. В. Письменная[1], С. Н. Родионова[2] ✉

[1] Курский областной клинический кожно-венерологический диспансер
ул. Димитрова, 62, г. Курск 305004, Российская Федерация

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

✉ e-mail: knsofia@mail.ru

Резюме

Цель исследования *– повышение качества прогнозирования возникновения, развития и диагностики ранних (донозологических) стадий кожных болезней за счет использования энергетических характеристик меридианных структур организма, реагирующих на проблемные ситуации до клинических проявлений заболеваний.*

Методы. *В качестве методов исследования выбрана теория биофизики акупунктуры в сочетании с методологией синтеза гибридных нечетких решающих правил. Энергетические характеристики меридианных структур организма определяются по отклонению электрических сопротивлений биологически активных точек (БАТ) от их номинальных значений.*

Результаты. *Выбранный источник информации и метод синтеза гибридных нечетких моделей прогнозирования и донозологической диагностики кожных болезней апробированы на решении задачи прогнозирования обострения генитального герпеса.*

По результатам математического моделирования и статистических испытаний на репрезентативных контрольных выборках было показано, что полученная прогностическая модель, использующая только электрическое сопротивление БАТ «связанных» с поражением кожного покрова генитальных структур, обеспечивает уверенность в прогнозе обострения генитального герпеса на уровне 0,6.

Использование электрического сопротивления БАТ вместе с индивидуальными факторами риска повышает прогностическую уверенность до величины 0,9.

Заключение. *Полученная модель прогнозирования обострения генитального герпеса обеспечивает уверенность в принятиях решений не хуже 0,9, что является приемлемым показателем качества для практической дерматовенерологии, позволяя «работать» в условиях недостаточной статистики при плохоформализуемой структуре данных.*

Ключевые слова: *математическая модель; электрическое сопротивление биологически активных точек; прогнозирование; генитальный герпес; нечеткие решающие правила.*

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

© Лукашов А. Л., Письменная Е. В., Родионова С. Н., 2020

Для цитирования: Лукашов А. Л., Письменная Е. В., Родионова С. Н. Прогнозирование возникновения, развития и донозологическая диагностика кожных болезней по энергетическому разбалансу меридианных структур организма // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 102–117.

Поступила в редакцию 05.10.2020 *Подписана в печать 23.10.2020* *Опубликована 30.11.2020*

Method for Predicting and Diagnostics of Professional Diseases by Energetic Balance of Meridian Structures in the Organism

Mikhail I. Lukashov[1], Ekaterina V. Pismennaya[1], Sofia N. Rodionova [2] ✉

[1] Kursk Oblast Clinical Dermatovenerologic Dispensary
Dimitrova st., 62, Kursk 305004, Russian Federation

[2] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: knsofia@mail.ru

Abstract

Purpose of research. *The aim of the research is to improve the quality of forecasting the occurrence, development and diagnosis of early (pre-nosological) stages of skin diseases by using the energy characteristics of the meridian structures of the body that respond to problem situations before the clinical manifestations of diseases.*

Methods. *The theory of biophysics of acupuncture in combination with the methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules is chosen as the research methods. The energy characteristics of the meridian structures of the body are determined by the deviation of the electrical resistances of biologically active points (BAT) from their nominal values.*

Results. *The selected source of information and the method of synthesis of hybrid fuzzy models for predicting and prenosological diagnosis of skin diseases were tested on the solution of the problem of predicting the exacerbation of genital herpes.*

According to the results of mathematical modeling and statistical tests on a representative test samples, it was shown that the obtained predictive model that uses only electric resistance BAT "associated" with the defeat of the skin of the genital structures provide confidence in the prediction of relapse of genital herpes at the level of 0.6.

Using the electrical resistance of the BAHT along with individual risk factors improves the predictive confidence to the value of 0.9.

Conclusion. *The obtained model for predicting the exacerbation of genital herpes provides confidence in decision-making no worse than 0.9, which is an acceptable quality indicator for practical dermatovenerology, allowing you to "work" in conditions of insufficient statistics with a poorly formalized data structure.*

Keywords: *mathematical model; electrical resistance of biologically active points; prediction; genital herpes; fuzzy decision rules.*

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

For citation: Lukashov M. I., Pismennaya E. V., Rodionova S. N. Method for Predicting and Diagnostics of Professional Diseases by Energetic Balance of Meridian Structures in the Organism. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(3/4): 102–117. (In Russ.)

Received 05.10.2020 *Accepted 23.10.2020* *Published 30.11.2020*

***

Введение

Исследования, проводимые в России и за рубежом, а также собственные исследования показали, что меридианные структуры организма, состоящие из множества биологически активных (акупунктурных) точек, являются достаточно надежным индикатором состояния здоровья. Особенно интересно их применение в задачах прогнозирования и ранней (донозологической) диагностики, поскольку энергетическое состояние этих точек может начать изменятся задолго до клинических проявлений исследуемых заболеваний [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17].

В качестве основного теоретического аппарата выбрана теория биофизики акупунктуры, разработанная в Юго-Западном государственном университете (ЮЗГУ) на кафедре биомедицинской инженерии (БМИ), в рамках которой предложен метод синтеза нечётких правил принятия решений по электрическим характеристикам (ЭХ) БАТ в виде комбинаций четкой и нечеткой моделей [1; 2; 3; 4].

Использование этого метода предполагает, что для каждой решаемой задачи синтезируются функции принадлежности по всем информативным БАТ, что является сложной задачей, требующей привлечения специалистов в области биофизики акупунктуры и высококвалифицированных врачей (в нашем случае – дерматологов), обученных работе в работе с привлечением методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП).

В работе [18] предлагается значительно упростить процедуру синтеза гибридных нечетких решающих правил по энергетическому состоянию БАТ, разделив функции рефлексотерапевтов и врачей специалистов. При этом каждая из этих групп решает хорошо знакомые им задачи, что позволяет значительно снизить время решения с одновременным повышением качества синтезируемых решающих правил.

Материалы и методы

Выбранный метод синтеза решающих правил основывается на том, что для искомого класса задач по атласам меридиан определяются списки информативных биологически активных точек. Далее, по рекомендациям [18] для органа (системы) с «именем» s выбираются формула расчета их энергетического разбаланса ER_s с привлечением врачей-рефлексотерапевтов. Далее врачи-специалисты по исследуемым классам заболеваний (дерматологи), используя переменную ER_s в качестве базовой переменной, строят функции принадлежности $\mu_\ell\left(ER_s\right)$ к заболеванию ω_ℓ (ℓ =1, …, L; s = 1, …, S) . Для определения уверенности $U_{\ell r}$ в ω_ℓ для задачи r (r = п – прогноз, r = р – ранняя (донозологическая) стадия заболевания) используется две модели:

$$ER_s = F_E\left(EY_{sj}\right); \qquad (1)$$

$$U_{\ell r} = \mu_{\ell r}\left(ER_s\right), \qquad (2)$$

где EY_{sj} – энергетический разбаланс БАТ с именем Y_{sj}, для органов (систем) с именем s (s =1,…,S), (j = 1,…, J).

Уровень энергетического разбаланса определяется по рекомендациям работ [1; 2; 3; 4], по величине отклонений сопротивлений БАТ от их номинальных значений, измеряемых на переменном токе. В состав модели принятия решений входит логическое условие анализа величин диагностически значимых точек (ДЗТ) [1; 2; 3; 4; 18].

Условие энергетического разбаланса с учетом ДЗТ и выходом на расчет его уровня ER_s определяется выражением

$$ЕСЛИ \begin{bmatrix} \left(\delta R^D_{Y1} > \delta R^П\right) И \\ \left(\delta R^D_{Y2} > \delta R^П\right), \ldots \left(\delta R^D_{Yms} > \delta R^П\right) \end{bmatrix},$$

$$ТО \left[ER_s = F_E\left(EY_j\right)\right], ИНАЧЕ \left(ER_s = 0\right), \quad (3)$$

где $\delta R^D_{Y_j}$ – величина относительного отклонения сопротивлений R_{Y_j} для БАТ из ДЗТ; $\delta R^П$ – пороговое значение отклонений БАТ от номинального значения.

Выбор функций $EY_j(\delta R_j)$ и их агрегация в частные решающие правила в соответствии с рекомендациями [1; 2; 3; 4; 5; 18; 19] осуществляется по формуле

$$ER_S(j+1) = ER_S(j) + \\ + EY_{J+1}\left(\delta R_{j+1}\right)\left[1 - ER_S(j)\right], \qquad (4)$$

где $ER_S\ (1) = EY_1(\delta R_1)$.

В реальных задачах на основе единичного измерения ЭХ БАТ определять уверенность в принимаемых решениях следует весьма осторожно. Значительно большая уверенность достигается, если учитывать время «удержания» энергетического разбаланса на определенном уровне. Еще большая уверенность может быть получена, если учитывать динамику энергетического разбаланса на интервале наблюдения через выбранные экспертами промежутки времени [2; 4; 5; 18; 19].

Вариант получения «уточняющих» динамических моделей описан в работе [18], однако на практике получение моделей такого типа связано с большими трудностями методического и экспертного характера.

В данной работе предлагается использовать гораздо более простую табличную модель, обеспечивающую, по мнению экспертов, достаточную для практической медицины точность принятия решений.

Для построения такой таблицы формируется шкала отклонений OER_s ЭХБАТ от первично измеренного и вычисленного по формуле (4) показателя ER_s:

$$OER_s = ER_{sk} - ER_{so}, \qquad (5)$$

где ER_{so} – величина энергетического разбаланса, рассчитанная по первичному измерению ЭХБАТ; ER_k – величина энергетического разбаланса, измеряемого на k-м промежутке времени.

Шкала OER_s имеет область определения [-1,…,+1]. Отрицательные значения OER_s характеризуют уменьшение энергетического разбаланса, что соответствует уменьшению риска появления и развития заболевания ω_ℓ для органа s.

Положительные значения OER_s соответствуют повышению риска появления и развития ω_ℓ с переходом к гипотезе о наличии донозологических форм заболевания.

Шкала OER_s разбивается на равные интервалы в положительную и отрицательную сторону относительно условно нулевого интервала (слева и справа от $OER_s = 0$). Величину интервала следует выбирать, пользуясь рекомендациями математической статистики. Например, условно нулевой интервал ΔER_o соответствует интервалу $-0{,}1 \leq OER_s < 0{,}1$. Левее него лежит интервал $-\Delta ER_1$, для которого $-0{,}3 \leq OER_s < -0{,}1$. Правее – интервал ΔER_1, для которого $0{,}1 \leq OER_s < 0{,}3$ и т. д. Для крайних интервалов $-\Delta ER_5$: $OER_s < -0{,}9$; ΔER_5: $OER_s > 0{,}9$.

Интервалы $\pm\Delta ER_i$ формируют строки таблицы принятия решений. Столбцы соответствуют интервалам времени фиксации энергетического разбаланса t_k.

В зависимости от структуры данных, особенностей решаемой задачи и предпочтений экспертов, в качестве элементов таблицы предлагается выбирать либо поправочные коэффициенты β_{ik}, либо частные коэффициенты уверенности K_{ik} ($i = 0, \ldots, I$); (k , …, K).

Поправочные коэффициенты уточняют уверенность в принятии решения для модели (2). Уточненная уверенность

$$U_{\ell r} = \beta_{lr} \cdot \mu_\ell \left(ER_s \right), \qquad (6)$$

где β_{lr} – поправочный коэффициент, выбираемый из таблицы принятия решений, построенной для заболевания ω_ℓ (ℓ =1,…, L) для задачи r с вычисленной строкой i и выбранным столбцом k.

Таблица 1. Вариант таблицы принятия решений

Table 1. Version of the decision table

ΔER	t_1	…	t_k	…	t_K
$-\Delta ER_I$	$-\beta_{I1}$		$-\beta_{Ik}$		$-\beta_{IK}$
…					
ΔER_0	B_{01}		B_{0k}		B_{0K}
…					
ΔER_I	β_{I1}		β_{Ik}		β_{IK}

При определении величин поправочных коэффициентов эксперты руководствуются следующими соображениями. Для положительных ΔER коэффициенты β_{ik} выбираются больше

единицы, но при условии, что $U_{\ell r}$ не превышает значения единицы. Для отрицательных ΔER – коэффициенты $0 \le \beta_{ik} < 1$. Общие рекомендации по выбору β_{ik} можно найти в работах [5; 19]. Таблица 1 иллюстрирует вариант общего вида таблицы принятия решений с поправочным коэффициентом.

Рекомендации по выбору частных коэффициентов уверенности K_{ik} приведены в работах [2; 3; 5; 19]. Уточненная уверенность в принимаемых решениях для положительных и нулевого интервалов ΔER_i определяется выражением

$$U_{\ell r} = U_{\ell r} + K_{ik} - U_{\ell r} \cdot K_{ik}. \qquad (7)$$

Уточненная уверенность для отрицательных интервалов определяется выражением

$$U_{\ell r} = 1 - U_{\ell r} - K_{ik} + U_{\ell r} \cdot K_{ik}. \qquad (8)$$

С целью повышения качества принимаемых решений дополнительно к энергетической реакции БАТ используют дополнительные информативные признаки, традиционные для классической медицины, а энергетические характеристики БАТ чаще всего служат как руководство к дальнейшим действиям.

Например, показатели $U_{\ell r}$ или $U_{\ell r}$ могут использоваться при синтезе решающих правил в соответствии с методологией синтеза гибридных нечетких решающих правил [5; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25].

Результаты и их обсуждение

В популярном атласе меридиан [14] с заболеваниями кожи связаны следующие ситуации и точки: кожные заболевания, сопровождающиеся зудом (P7); кожные сыпи (P11); зуд (P11, VB30, F5); крапивница (GI11, E32, V11, V12, V17, V20, TC9, TC19); экзема (GI11, VB30, NC19); нейродермит (атопический дерматит) (GI11); кожные сыпи аллергического характера (GI15); воспаление и зуд кожи лица (GI20); аллергии (V40, VB41); экзема на кистях (MC8); зудящие дерматозы (VB31); экзема в промежности (F10); зуд половых органов (F11, VC1, VC7); зуд в промежности (VG1); хейлит (VG27); зуд век (VG28).

В круглых скобках приведены имена БАТ, принадлежащие к классами ω_ℓ в их французской классификации.

Дополнительно кожные заболевания и их проявления связаны с проекционными зонами стопы – TC9 и TC19.

Среди внемеридианных точек ушной раковины с кожными заболеваниями связаны точки: AP13 (кожные болезни); AP22 (все кожные болезни); AP29 (кожные болезни); AP30 (зуд); AP31 (зуд, противоаллергическая); AP71 (аллергическая сыпь, крапивница); AP78 (все аллергические заболевания); AP106, AP107, AP108 (кожный зуд и кожные заболевания в области спины) [14] .

Ряд кожных болезней имеют не прямую, а синдромалную связь с иссле-

дуемыми заболеваниями [6; 7; 8], например герпес [7; 8; 9; 10; 26].

Из множества задач прогнозирования и диагностики кожных болезней в данной работе рассматривается задача получения математической модели прогнозирования обострения генитального герпеса.

В соответствии с общими рекомендациями МСГНРП экспертам была поставлена задача определения рационального времени прогнозирования T_0, для которого по выбранной системе факторов риска ожидается наиболее точная классификация пациентов на два класса: ω_0 – риск возникновения обострения в течение времени T_0 отсутствует; $\omega_{об}$ – в течение времени T_0 с высокой уверенностью наступит обострение генитального герпеса [5; 10; 11; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25].

Проведенный анализ показал, что симптоматике генитального герпеса соответствуют пять точек, «связанных» с заболеваниями кожи: F11, VC1, VC7, VG1 и P7 с парой ДЗТ P7 и VC7.

По выбранным точкам в течение трех месяцев изучалась динамика их поведения с фиксацией фактов обострения генитального герпеса. Для двух классов ω_0 и $\omega_{об}$ определялись информативность по Кульбаку и экспертная оценка «важности» каждой из БАТ для задачи прогнозирования обострения генитального герпеса. На экспертном уровне в списке информативных БАТ было решено оставить точки с $I_к > 20$ (табл. 2).

Таблица 2. Оценка информативности БАТ для задачи прогнозирования обострения генитального герпеса

Table 2. Evaluation of the information content of the BAT

Точка	Класс	Информативность по классу	Общая информативность I_k	Экспертная оценка ценности точки
1	2	3	4	5
F11	ω_0	5	9	0,1
	$\omega_{об}$	4		
VC1	ω_0	12	22	0,2
	$\omega_{об}$	10		
VC7	ω_0	14	31	0,35
	$\omega_{об}$	17		
VG1	ω_0	10	18	0,25
	$\omega_{об}$	8		
P7	ω_0	10	25	0,3
	$\omega_{об}$	15		

Далее, было организовано наблюдение за динамикой наиболее информативных точек VC7 и P7.

В ходе этих наблюдений было установлено, что если сопротивления этих точек устойчиво находятся за порогом нормы, то через 8±1 день на уровне значимости 0,05 наблюдается обострение генитального герпеса. С учетом этого была выбрана величина $T_0 = 8$ дней.

Используя рекомендации работ [3; 4; 5; 18; 19] эксперты для выражений (3) и (4) получили графики и аналитические выражения для функций $EY_j(\delta R_j)$ при пороговом значении $\delta R_{Y_j}^D = 15\%$.

Для прогностической модели (2) обострения генитального герпеса на экспертном уровне был получен график функции принадлежности к классу $\omega_{об}$ (рис.).

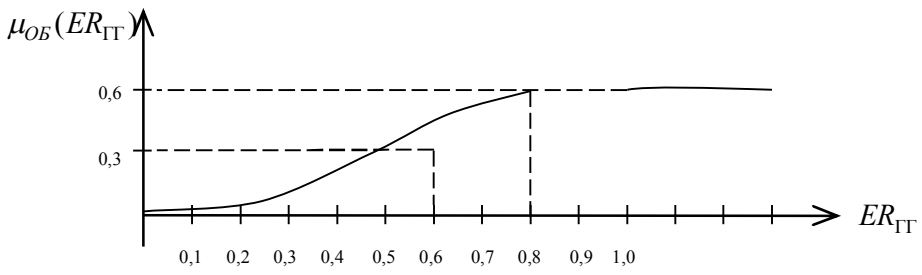

Рис. График функции принадлежности к классу $\omega_{об}$

Fig. Graph of the membership function to the class $\omega_{об}$

Выбор максимальной величины соответствующей функции принадлежности на рисунке обусловлен тем, что эксперты в задаче прогнозирования обострения генитального герпеса «доверяют» БАТ на уровне 0,6. Такая же уверенность при использовании в качестве предикторов только БАТ подтверждена результатами математического моделирования и статистическими испытаниями на репрезентативных контрольных выборках.

Значительно повысить точность прогноза можно, если кроме сопротивлений БАТ в качестве предикторов дополнительно использовать уровни психоэмоционального напряжения UP и утомления UU, уровень защиты UZ организма, а также результаты опросов и осмотров [6; 9; 10; 11; 12; 13].

Данные опросов и осмотров для класса $\omega_{об}$ эксперты оформили в виде следующего опросника:

1. В анамнезе ОРВИ грипп или другие болезни, ослабляющие иммунную систему (b_1).

2. Переохлаждение организма (b_2).

3. Перегрев организма (b_3).

4. Медицинские манипуляции на половых органах (b_4).

5. Злоупотребление алкоголем (b_5).

6. Чрезмерное пребывание на солнце или злоупотребление солярием (избыточные дозы ультрафиолетового излучения) (b_6).

7. В анамнезе микрохирургические вмешательства на тройничном нерве (b_7).

По согласованию с экспертами эта группа признаков представлена двоичным кодом (1 – есть признак, 0 – нет признака).

Для каждого из дополнительно выбранных признаков аналогично таблице 1 по классам ω_0 и $\omega_{об}$ определялись информативность по Кульбаку и экспертная оценка их ценности в прогностических правилах (табл. 3).

Таблица 3. Информативная ценность пространства прогностических признаков

Table 3. Informative value of the predictive feature space

Признак	класс	Информативность по классу	Общая информативность I_k	Экспертная оценка прогностической ценности
1	2	3	4	5
UP	ω_0	12	23	0,24
	$\omega_{об}$	11		
UU	ω_0	14	29	0,3
	$\omega_{об}$	15		
UZ	ω_0	16	36	0,4
	$\omega_{об}$	20		
$в_1$	ω_0	1,5	3	0,04
	$\omega_{об}$	1,5		
$в_2$	ω_0	1,5	3	0,04
	$\omega_{об}$	1,5		
$в_3$	ω_0	1,5	3	0,04
	$\omega_{об}$	1,5		
$в_4$	ω_0	1,5	3	0,04
	$\omega_{об}$	1,5		
$в_5$	ω_0	1,5	3	0,04
	$\omega_{об}$	1,5		
$в_6$	ω_0	1,5	3	0,04
	$\omega_{об}$	1,5		
$в_7$	ω_0	1,5	3	0,04
	$\omega_{об}$	1,5		
Общая по группе $в_i$	ω_0	10	21	0,28
	$\omega_{об}$	11		

Величина порогового значения I_k выбрана экспертами на уровне 20. Признаков $в_i$ такой информативностью не обладает, однако их совместное использование позволяет получить $I_k = 21$.

В соответствии с общими рекомендациями выбранной методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил все выбранные предикторы объединяются в финальное прогностическое решающее правило, аналогичное модели (4). Уверенность в правильном прогнозе такого правила, по мнению экспертов, превышает величину 0,9, что подтверждено результатами математического моделирования и статистическими испытаниями на репрезентативных контрольных выборках.

Выводы

В работе показано, как, используя общие рекомендации МСГНРП применительно к особенностям биофизики акупунктуры, решать задачи синтеза нечетких решающих правил прогнозирования, ранней и дифференциальной диагностики заболеваний кожи по величине энергетического разбаланса биологически активных точек, входящих в меридианные структуры организма человека.

В качестве практического примера получена нечеткая модель прогнозирования обострений генитального герпеса, обеспечивающая прогностическую уверенность на уровне 0,6, только по величине разбаланса электрического сопротивления информативных БАТ. При использовании индивидуальных факторов риска в качестве дополнительных информативных признаков уверенность в прогнозе обострения генитального герпеса превышает величину 0,9.

Список литературы

1. Гадалов В. Н., Кореневский Н. А., Снопков В. Н. Математические модели рефлекторных систем организма человека и их использование для прогнозирования и диагностики заболеваний // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2012. Т. 11, № 2. С. 515–521.

2. Кореневский Н. А., Буняев В. В., Яцун С. М. Компьютерные системы ранней диагностики состояния организма методами рефлексологии: монография / Южно-Российский государственный технический университет. Новочеркасск, 2003. 206 с.

3. Кореневский, Н. А., Крупчатников Р. А. Информационно-интеллектуальные технологии в рефлексодиагностике и рефлексотерапии: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 528 с.

4. 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. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 528 с.

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

6. Синтез решающих правил прогнозирования обострения заболеваний на примере генитального герпеса / М. И. Лукашов, А. Г. Устинов, И. И. Хрипина, С. В. Солошенко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2014. № 3. С. 70–80.

7. Лукашов М. И., Агарков Н. М., Кореневский Н. А. Оценка состояния больных генитальным герпесом методами рефлексодиагностики // Вестник новых медицинских технологий. 2010. Т. 17. № 1. С. 137–138.

8. Использование методов рефлексодиагностики при ведении больных генитальным герпесом / М. И. Лукашов, Н. А. Кореневский, А. В. Еремин, Р. А. Крупчатников // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2009. Т. 8, № 4. С. 869–872.

9. Прогнозирование обострений генитального герпеса на основе итерационных нечетких моделей / М. И. Лукашов, Н. А. Кореневский, А. В. Еремин, В. Н. Гадалов // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2009. Т. 8, № 4. С. 1029–1031.

10. Прогнозирование обострения герпесвирусных инфекций на основе комбинированных правил нечеткого вывода / М. И. Лукашов, С. Ф. Яцун, В. И. Серебровский, С. В. Дегтярев, Е. П. Попечителев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 1, ч. 1. С. 35–41.

11. Лукашов М. И., Яцун С. М., Савченко Н. Н. Нечеткое прогнозирование обострения кожных болезней // Биомедицинская радиоэлектроника. 2009. № 5. С. 23–32.

12. Лукашов М.И., Кореневский Н. А., Савченко Н. Н. Прогнозирование обострения заболеваний у дерматологических больных на основе нечетких моделей обучаемых по структуре данных // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2009. Т. 8, № 3. С. 290–293.

13. Использование информационных технологий для прогнозирования и диагностики инфекционных заболеваний (на примере генитального герпеса): монография / М. И. Лукашов, Н. А. Кореневский, В. И. Серебровский [и др.]. Курск: изд-во Курск. гос. с-х. акад., 2011. 123 с.

14. Гаваа Лувсан. Очерк методов восточной рефлексотерапии. 3-е изд., перераб. и доп. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1991. 432 с.

15. Портнов Ф. П. Электропунктурная рефлексотерапия. Рига: Зинатне, 1980. 245 с.

16. Synthesis of fuzzy logic for prediction and medical diagnostics by energy characteristics of acupuncture points / R. Al-Kasasbeh, N. Korenevskiy, F. Ionescu, M. Alshamasin, A. Kuzmin // Acupunct Meridian Stud. 2011. N 4(3). P. 175–182.

17. Prediction of gastric ulcers based on the change in electrical resistance of acupuncture points using fuzzy logic decision-making / N. A. Korenevskiy, R. T. Al-Kasasbeh, M. Alshamasin, F. Ionescou, A. Smith // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2013. Vol. 16, is. 3. P. 302–313.

18. Кореневский Н. А., Григоров И. Р., Разумова К. В. Метод прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний по энергетическому разбалансу меридианных структур организма // Известия Юго-Западного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 2. С. 75–90.

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

20. 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.

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

22. Кореневский Н. А. Проектирование систем принятия решений на нечетких сетевых моделях в задачах медицинской диагностики и прогнозирования // Телекоммуникации. 2006. № 6. С. 25–31.

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

24. Synthesis of combined fuzzy decision rules based on the exploration analysis data / R. T. Al-Kasabeh, N. A. Korenevskiy, F. Ionescu, A. A. Kuzmin // Proc. 4th IAFA Intern. Conference Interdisciplinary Approaches in Fractal Analysis. Bucharest, 2009. P. 71–78.

25. Korenevskiy N. A., Gorbatenko S. A. Generation of fuzzy network models taught on basic of data structure for medical expert systems // Biomedical Engineering. Vol. 42, N 2. P. 67–72.

26. Лукашов М. И., Яцун С. М., Кореневский Н. А. Компьютерные системы в дерматологии / Курск. гос. ун-т. Курск, 2009. 227 с.

References

1. Gadalov V. N., Korenevsky N. A., Snopkov V. N. Matematicheskie modeli reflektornykh sistem organizma cheloveka i ikh ispol'zovanie dlya prognozirovaniya i diagnostiki zabolevanii [Mathematical models of reflex systems of the human body and their use for predicting and diagnosing diseases]. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Control in Biomedical Systems*, 2012, vol. 11, no. 2, pp. 515–521. (In Russ.)

2. KorenevskyN. A., Bunyaev V. V., Yatsun S. M. Komp'yuternye sistemy rannei diagnostiki sostoyaniya organizma metodami refleksologii [Computer systems for early diagnosis of the state of the body by methods of reflexology]. Novocherkassk, South-Russian State Technical University Publ. 2003. 206 p. (In Russ.)

3. Korenevsky N. A., Krupchatnikov R. A. Informatsionno-intellektual'nye tekhnologii v refleksodiagnostike i refleksoterapii [Information and intellectual technologies in reflexodiagnostics and reflexotherapy]. Stary Oskol, TNT Publ., 2013. 528 p. (In Russ.)

4. Korenevsky N. A., Krupchatnikov R. A., Al-Qasasbeh R. T. Teoreticheskie osnovy biofiziki akupunktury s prilozheniyami v meditsine, psikhologii i ekologii na osnove nechetkikh setevykh modelei [Theoretical foundations of biophysics of acupuncture with applications in medicine, psychology and ecology based on fuzzy network models]. Stary Oskol, TNT Publ., 2013. 528 p. (In Russ.)

5. Korenevsky N. A., Gorbatenko S. A., Serebrovsky V. I. Otsenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya obuchayushchikhsya na osnove gibridnykh intellektual'nykh tekhnologii [Assessment and management of the state of health of students on the basis of hybrid intelligent technologies]. Stary Oskol, TNT Publ., 2016. 472 p. (In Russ.)

6. Lukashov M. I., Ustinov A. G., Khripina I. I., Soloshenko S. V. Sintez reshayushchikh pravil prognozirovaniya obostreniya zabolevanii na primere genital'nogo gerpesa [Synthesis of decisive rules for predicting exacerbation of diseases on the example of genital herpes]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Technology, Informatics. Medical Instrumentation*, 2014, no. 3, pp. 70–80. (In Russ.)

7. Lukashov M. I., Agarkov N. M., Korenevsky N. A. Otsenka sostoyaniya bol'nykh genital'nym gerpesom metodami refleksodiagnostiki [Assessment of the state of patients with genital herpes by reflexodiagnostics methods]. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii = Bulletin of new medical technologies*, 2010, vol. 17, no. 1, pp. 137–138. (In Russ.)

8. Lukashov M. I., Korenevsky N. A., Eremin A. V., Krupchatnikov R. A. Ispol'zovanie metodov refleksodiagnostiki pri vedenii bol'nykh genital'nym gerpesom [The use of reflexodiagnostic methods in the management of patients with genita]. *Sistemnyi*

analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System analysis and Control in Biomedical Systems, 2009, vol. 8, no. 4, pp. 869–872. (In Russ.)

9. Lukashov M. I., Korenevsky N. A., Eremin A. V., Gadalov V. N. Prognozirovanie obostrenii genital'nogo gerpesa na osnove iteratsionnykh nechetkikh modelei [Prediction of exacerbations of genital herpes based on iterative fuzzy models]. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Control in Biomedical Systems*, 2009. vol. 8, no. 4, pp. 1029–1031. (In Russ.)

10. Lukashov M. I., Yatsun S. F., Serebrovsky V. I., Degtyarev S. V., Pepechitelev E. P. Prognozirovanie obostreniya gerpes virusnykh infektsii na osnove kombinirovannykh pravil nechetkogo vyvoda [Prediction of exacerbation of herpes viral infections on the basis of combined rules of fuzzy inference]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 1, pt 1, pp. 35–41. (In Russ.)

11. Lukashov M. I., Yatsun S. M., Savchenko N. N. Nechetkoe prognozirovanie obostreniya kozhnykh boleznei [Fuzzy prediction of exacerbation of skin diseases]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2009, no. 5, pp. 23–32. (In Russ.)

12. Lukashov M. I., Korenevsky N. A., Savchenko N. N. Prognozirovanie obostreniya zabolevanii u dermatologicheskikh bol'nykh na osnove nechetkikh modelei obuchaemykh po strukture dannykh [Prediction of exacerbation of diseases in dermatological patients on the basis of fuzzy models of trainees by data structure]. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Control in Biomedical Systems*, 2009, vol. 8, no. 3, pp. 290–293. (In Russ.)

13. Lukashov M. I., Korenevsky N. A., Serebrovsky V. I., eds. Ispol'zovanie informatsionnykh tekhnologii dlya prognozirovaniya i diagnostiki infektsionnykh zabolevanii (na primere genital'nogo gerpesa) [The use of information technologies for predicting and diagnosing infectious diseases (for example, genital herpes)]. Kursk, Kursk. state agricultural acad. Publ., 2011. 123 p. (In Russ.)

14. Gavaa Luvsan. Ocherk metodov vostochnoi refleksoterapii [Essay on the methods of oriental reflexology]. 3rd ed. Novosibirsk, Science, Sib. Branch Publ., 1991. 432 p. (In Russ.)

15. Portnov F. P. Elektropunkturnaya refleksoterapiya [Electropuncture reflexology]. Riga, Zinatne Publ., 1980. 245 p. (In Russ.)

16. Al-Kasasbeh R., Korenevskiy N., Ionescu F., Alshamasin M., Kuzmin A. Synthesis of fuzzy logic for prediction and medical diagnostics by energy characteristics of acupuncture points. *Acupunct Meridian Stud.*, 2011, no. 4(3), pp. 175–182. (In Russ.)

17. Korenevskiy N. A., Al-Kasasbeh R. T., Alshamasin M., Ionescou F., Smith A. Prediction of gastric ulcers based on the change in electrical resistance of acupuncture points

using fuzzy logic decision-making. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2013, vol. 16, is. 3, pp. 302–313.

18. Korenevsky N. A., Grigorov I. R., Razumova K. V. Metod prognozirovaniya i diagnostiki professional'nykh zabolevanii po energeticheskomu razbalansu meridiannykh struktur organizma [Method of forecasting and diagnostics of occupational diseases based on the energy imbalance of the body's meridian structures]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo universiteta. Seriya. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwestern University. Series: Management, Computer technology, Informatics. Medical Instrumentation*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 75–90. (In Russ.)

19. Korenevsky N. A., Rodionova S. N., Khripina I. I. Metodologiya sinteza gibridnykh nechetkikh reshayushchikh pravil dlya meditsinskikh intellektual'nykh sistem podderzhki prinyatiya reshenii [Methodology for the synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems]. Stary Oskol, TNT Publ., 2019. 472 p. (In Russ.)

20. Korenevsky N. A. Metod sinteza geterogennykh nechetkikh pravil dlya analiza i upravleniya sostoyaniem biotekhnicheskikh sistem [Method of synthesis of heterogeneous fuzzy rules for analysis and control of the state of biotechnical systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Technology, Informatics. Medical Instrumentation*, 2013, no. 2, pp. 99–103. (In Russ.)

21. Korenevsky N. A. Ispol'zovanie nechetkoi logiki prinyatiya reshenii dlya meditsinskikh ekspertnykh sistem [The use of fuzzy decision-making logic for medical expert systems]. *Meditsinskaya tekhnika = Medical Technology*, 2015, no. 1, pp. 33–35. (In Russ.)

22. Korenevsky N. A. Proektirovanie sistem prinyatiya reshenii na nechetkikh setevykh modelyakh v zadachakh meditsinskoi diagnostiki i prognozirovaniya [Designing decision-making systems on fuzzy network models in problems of medical diagnostics and forecasting]. *Telekommunikatsii = Telecommunications*, 2006, no. 6, pp. 25–31. (In Russ.)

23. Korenevsky N. A., Razumova K. V. Sintez kollektivov gibridnykh nechetkikh modelei otsenki sostoyaniya slozhnykh sistem [Synthesis of collectives of hybrid fuzzy models for assessing the state of complex systems]. *Naukoemkie tekhnologii = Science-intensive Technologies*, 2014, vol. 15, no. 12, pp. 31–39. (In Russ.)

24. Al-Kasabeh R. T., Korenevskiy N. A., Ionescu F., Kuzmin A. A. Synthesis of combined fuzzy decision rules based on the exploration analysis data. Proc. 4th IAFA Intern. Conference Interdisciplinary Approaches in Fractal Analysis. Bucharest, 2009, pp. 71–78.

25. Korenevskiy N. A., Gorbatenko S. A. Generation of fuzzy network models taught on basic of data structure for medical expert systems. *Biomedical Engineering*, 2008, vol. 42, no. 2, pp. 67–72.

26. Lukashov M. I., Yatsun S. M., Korenevsky N. A. Komp'yuternye sistemy v dermatologii [Computer systems in dermatology]. Kursk, Kursk State Univ. Publ., 2009. 227 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Лукашов Михаил Иванович, главный врач ОБУЗ «Курский областной клинический кожно-венерологический диспансер», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kokkvd@mail.ru

Письменная Екатерина Васильевна, кандидат медицинских наук, заместитель главного врача по организационно-методической работе, ОБУЗ «Курский областной клинический кожно-венерологический диспансер», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kokkvd@mail.ru

Родионова Софья Николаевна, преподаватель кафедры биомедицинской инженерии, ФГБОУ ВО «Курский государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: knsofia@mail.ru

Mikhail I. Lukashov, Head Physician of Oblast Government-Financed Health Institution Kursk Oblast Clinical Dermatovenerologic Dispensary, Kursk, Russian Federation, e-mail: kokkvd@mail.ru

Ekaterina V. Pismennaya, Cand. of Sci. (Medical), Deputy Head Physician of Oblast Government-Financed Health Institution Kursk Oblast Clinical Dermatovenerologic Dispensary, Kursk, Russian Federation, e-mail: kokkvd@mail.ru

Sofia N. Rodionova, Lecturer at the Department of Biomedical Engineering, Kursk State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: knsofia@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 57.087

Нечеткие модели дифференциальной диагностики очаговых образований поджелудочной железы по данным эндоскопической ультрасонографии на основе анализа реперных схем эталонных эндосонограмм

В. А. Белозеров[1], Н. А. Кореневский[2] ✉

[1] Курская областная клиническая больница
ул. Сумская, 45-а, г. Курск 305007, Российская Федерация

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

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. *Злокачественные новообразования поджелудочной железы занимают 4-е место в структуре онкологической смертности, что связано с их поздней диагностикой. Особую трудность представляет дифференциальная диагностика очаговых образований поджелудочной железы из-за схожести их эхосемиотики. Цель исследования – повышение качества диагностики очаговой патологии поджелудочной железы на основе анализа реперных схем эталонных эндосонограмм за счет использования гибридных нечетких математических моделей, при синтезе которых формальные процедуры строятся с использованием клинического опыта высококвалифицированных специалистов ультразвуковой диагностики.*

Методы*. В качестве методов исследования используется эндоскопическая ультрасонография в сочетании с методологией синтеза гибридных нечетких решающих правил, разработанной в Юго-Западном государственном университете.*

Результаты*. Выбранный источник информации и метод синтеза гибридных нечетких решающих правил позволили получить нечеткую гибридную модель дифференциальной диагностики хронического очагового панкреатита и протоковой аденокарциномы поджелудочной железы. По результатам математического моделирования и статистических испытаний на репрезентативных контрольных выборках было показано, что полученная модель дифференциальной диагностики, использующая только реперные изображения эталонных эндосонограмм, обеспечивает уверенность в искомом диагнозе на уровне 0,6. Дополнительная информация, получаемая при анализе эндосонограмм, повышает диагностическую уверенность до величины 0,9.*

© Белозеров В. А., Кореневский Н. А., 2020

Заключение. *Полученная модель дифференциальной диагностики хронического очагового панкреатита и протоковой аденокарциномы поджелудочной железы обеспечивает уверенность в принятиях решений не хуже 0,9, что является приемлемым показателем качества в клинической практике, позволяя «работать» в условиях недостаточной статистики при плохоформализуемой структуре данных.*

Ключевые слова*: математическая модель; дифференциальная диагностика; хронический очаговый панкреатит; протоковая аденокарцинома поджелудочной железы; реперная схема эталонной эндосонограммы; нечеткие решающие правила.*

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

Для цитирования: Белозеров В. А., Кореневский Н. А. Нечеткие модели дифференциальной диагностики очаговых образований поджелудочной железы по данным эндоскопической ультрасонографии на основе анализа реперных схем эталонных эндосонограмм // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 118–135.

Поступила в редакцию 10.08.2020 *Подписана в печать 28.09.2020* *Опубликована 30.11.2020*

Differential Diagnostics of Focal Formations of the Pancreas Using Fuzzy Models According to Endoscopic Ultrasonography Data Based on Analysis of Repeated Schemes of Ethalonomography

Vladimir A. Belozerov [1], Nicolay A. Korenevsky [1] ✉

[1] Kursk Regional Clinical Hospital
45 a Sumskaya str., Kursk 305007, Russian Federation

[2] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Abstract

Purpose of the research. *Malignant neoplasms of the pancreas occupy the 4th place in the structure of cancer mortality due to their late diagnosis. Differential diagnosis of focal formations of the pancreas is particularly difficult due to the similarity of their echosemiotics.*
Improving the quality of diagnosis of focal pancreatic pathology based on the analysis of reference schemes of reference endosonograms through the use of hybrid fuzzy mathematical models. When synthesizing these models, formal procedures are built using the clinical experience of highly qualified specialists in the field of ultrasound diagnostics.
Methods. *As research methods, endoscopic ultrasonography is used in combination with the methodology for the synthesis of hybrid fuzzy decision rules developed at Southwestern State University.*
Results. *The selected source of information and the method of synthesis of hybrid fuzzy decision rules made it possible to obtain a fuzzy hybrid model of differential diagnosis of chronic focal pancreatitis and ductal adenocarcinoma of the pancreas. Based on the results of mathematical modeling and statistical tests on representative control samples, it was shown that the resulting model of differential diagnosis, using only reference images of reference endosonograms, provides confidence in the desired diagnosis at the level of 0,6. Additional information obtained from the analysis of endosonograms increases the diagnostic confidence to a value of 0,9.*

Conclusion. *The resulting model of differential diagnosis of chronic focal pancreatitis and ductal adenocarcinoma of the pancreas provides confidence in decision-making no worse than 0,9, which is an acceptable quality indicator in clinical practice, allowing "work" in conditions of insufficient statistics with poorly formalized data structure.*

Keywords: *mathematical model; differential diagnosis; chronic focal pancreatitis; ductal adenocarcinoma of the pancreas; reference scheme of the reference endosonogram; fuzzy decision rules.*

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

For citation: Belozerov V. A., Korenevsky N. A. Fuzzy Differential Diagnostics of Focal Formations of the Pancreas Using Fuzzy Models According to Endoscopic Ultrasonography Data Based on Analysis of Repeated Schemes of Ethalonomography. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(3/4): 118–135. (In Russ.)

Received 10.08.2020 *Accepted 28.09.2020* *Published 30.11.2020*

Введение

В большинстве развитых стран рак поджелудочной железы (ПЖ) занимает одно из ведущих мест в заболеваемости и смертности среди онкологических заболеваний органов пищеварения [1].

Дифференциальная диагностика рака ПЖ и хронического панкреатита (ХП) представляют значительные трудности, что связано с особенностями анатомического расположения ПЖ, отсутствием патогномоничных симптомов и клинических проявлений при небольших размерах опухоли [2; 3; 4; 5].

Эндоскопическая ультрасонография (ЭУС) является одним из наиболее чувствительных методов визуализации опухолей ПЖ, что особенно актуально для идентификации образований, не диагностированных другими методами, такими как компьютерная томография в [6]. Метод используется для уточняющей и дифференциальной диагностики при опухолях, кистозных новообразованиях ПЖ и панкреатитах и определяет показания к оперативному вмешательству и его характер [2; 7].

Вместе с тем клиницистами признается, что ЭУС является сложным для освоения и высоко оператор-зависимым методом, результаты которого значительно зависят от опыта исследователя [6; 8]. Представленная в литературе эндосонографическая семиотика патологии ПЖ не носит системного характера. Только в немногих исследованиях проводятся попытки объективизировать данные ЭУС с использованием методов математической статистики [2; 3; 8].

Одним из путей решения проблемы объективизации и точности анализа медицинских изображений, в том числе и эндосонограмм, является использование информационных и интеллектуальных технологий для интерпретации исследуемого класса изображений.

Активное внедрение в клиническую практику информационных технологий создало предпосылки для увеличения объема и точности автоматизирован-

ной обработки медицинских изображений. В области построения систем поддержки принятия диагностических решений активно используются: концепции построения автоматизированных медицинских информационных систем (МИС), теоретические принципы создания медицинских экспертных систем (МЭС), модели представления знаний, нейронные сети и нечеткий логический вывод [4; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19].

Интеллектуальная поддержка принятия решений особенно актуальна в диагностике онкопатологии ПЖ. Множество научных групп по всему миру занимаются разработкой новых и модификацией существующих компьютерных методов ранней диагностики онкологических заболеваний на основе анализа медицинских изображений и видеоданных. Основные усилия исследователей направлены на улучшение процесса детектирования различной патологии путем расширения признакового пространства для выделенных областей интереса (ROI), предположительно являющихся патологией, повышения точности расчета значений признаков областей интереса, а также применения наиболее современных и эффективных моделей классификации патологических состояний, свойственных определенным заболеваниям.

Для автоматизированной обработки изображений в мировой практике используют методы распознавания, основанные на принципе Виолы – Джонса, технологии бустинга и нейросетевых моделях классификаторов (технологии *Bagging* и *Boosting* используют множества базовых классификаторов с последующей агрегацией их решений, направленной на снижение ошибок первого и второго рода). В настоящее время получили широкое распространение так называемые гибридные технологии, позволяющие объединять в одном классификаторе технологии обучаемых классификаторов и технологии мягких вычислений, успешно функционирующих в условиях неопределенности и реализующих комплексное использование различных методов искусственного интеллекта, позволяющих сформировать новую методологию построения таких систем. Однако во многих случаях они не обеспечивают получение соответствующих требованиям решений ввиду малообоснованного выбора параметров моделирования, при этом нахождение адекватных решений из-за необходимости многократного выполнения реализаций используемых методов, алгоритмов и моделей с целью выбора наиболее оптимальных параметров сопровождается большими временными и материальными затратами.

Определенным образом перечисленные и ряд других недостатков устраняются методологией синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), разработанной в Юго-Западном государственном университе-

те (ЮЗГУ) [4; 5; 10; 11; 12; 17; 20; 21; 22; 23]. Отличительной особенностью МСГНРП является активное соединение естественного интеллекта врачей (клиническое мышление) и интеллекта инженера-когнитолога с элементами искусственного интеллекта. Клиническое мышление восполняет недостаток необходимых статистических данных и позволяет при взаимодействии с инженером-когнитологом строить формальные модели для плохоформализуемых задач. Инженер-когнитолог, используя данные разведочного анализа, подбирает математические модели, адекватные структуре данных решаемых задач. Рациональное взаимодействие интеллектуальных составляющих обеспечивается соответствующим алгоритмическим обеспечением МСГНРП [20; 21; 22]. Такой подход даёт возможность создавать качественно новые МИС, позволяющие решать более широкий круг задач интерпретации изображений РС и диагностики социально значимых заболеваний, обеспечивая эффективность прилагаемых решений в условиях неполноты и неопределённости исходных данных [11].

Применительно к дифференциальной диагностике патологии ПЖ интеллект опытных врачей используется для анализа плохоструктурированных изображений эндосонограмм, позволяя одномоментно выделять из зоны клинического интереса информативные области, характерные для исследуемой патологии. Причем эти области формируются под воздействием множества факторов, иногда не доступных искусственному интеллекту. Сюда входят опыт, интуиция, коллективный разум и другие, возможно плохо изученные особенности мышления.

Задачи исследования: с целью улучшения дифференциальной диагностики патологии ПЖ и объективизации результатов ЭУС требуется введение и описание четких универсальных характеристик эхопризнаков, описывающих исследуемую патологию, в частности признак «эхографическая текстура», и сформулировать эти характеристики для исследуемой патологии ПЖ. Для количественной оценки изображений необходимо выделить ключевые реперные схемы на основе эталонных эндосонограмм, отображающие типовую узнаваемую эхотекстуру, которую бы могли анализировать и оценивать эксперты с целью определения коэффициентов уверенности в отнесении пациентов к какому-либо классу патологии. При этом патология, отображенная на реперных схемах, должна быть подтверждена гистологически по результатам исследования биоптатов, полученных в результате оперативного лечения пациентов. Далее путем построения продукционных нечетких решающих правил необходимо определить коэффициенты уверенности в принадлежности к исследуемой патологии, с последующей проверкой срабатывания решающих правил по анализу контрольной выборки пациентов контрольной

группы с подтвержденной ранее патологией.

Материалы и методы

В дифференциальной диагностике очаговой патологии ПЖ информативны следующие эндосонографические характеристики очага: форма, размеры, эхогенность, гомогенность, структура, характер и четкость контуров, наличие или отсутствие панкреатического рисунка и включений. При этом в литературе отсутствует детальная расшифровка этих понятий, что значительно затрудняет интерпретацию эхопризнаков. Неоднозначно в литературе трактуются такие эхопризнаки, как однородность очага и четкость его контуров. Ключевым эхопризнаком в дифференциальной диагностике очаговых образований ПЖ является наличие панкреатического рисунка [3; 18]. Предполагается что это однородный, мелкозернистый, крапчатый рисунок, имеющий вид «соли с перцем». Детального его описания не встречается не только в отечественной, но и в зарубежной литературе. В связи с этим представляется актуальной проблема детализации признака эхографической текстуры ПЖ с целью объективизации данных эндосонографии.

В отделении эндоскопии Курской областной клинической больницы ЭУС выполнена у 656 пациентов. Женщин было 385 (58,7%), мужчин – 271 (41,3%). Возраст больных варьировал от 19 до 90 лет. Опухоли поджелудочной железы выявлены у 130 (19,8%) больных, различные формы хронического панкреатита диагностированы у 127 (19,4%) пациентов.

С целью анализа данных производилась видеофиксация всех исследований с последующей архивацией информации на электронных носителях.

В ходе выполнения ЭУС нами изучалась эхографическая текстура при различной очаговой патологии ПЖ. Особое внимание уделяли диагностике очаговой формы ХП и протоковой аденокарциномы ПЖ с различной степенью дифференцировки. Собственные наблюдения и экспертный анализ показали, что, анализируя сонограмму, врач визуализирует некоторую интегральную картину единого целостного изображения, практически не разделяя его на составляющие, что также относится и к эхографической текстуре очагового образования. Поэтому понятие эхографической текстуры очагового образования в нашей работе мы определили как сочетание эхопризнаков внутри очага. Это форма, размеры, эхогенность структур внутри очага, характер распределения эхоструктур внутри очагового образования, а также слияние их с формированием лобул либо более крупных областей, которые в свою очередь также характеризуются соотношением размеров и характером контуров.

Визуальный анализ полученных изображений показал, что на вербальном уровне опытный врач ультразвуковой диагностики достаточно надежно

выделяет шесть основных характерных типов эхографической текстуры ПЖ, позволяющих осуществлять искомую классификацию. При этом меньшая детализация, по мнению экспертов, приводит к снижению качества диагностики, а большая детализация вызывает перенапряжение функции селективности внимания и потере четкости восприятия врача, принимающего диагностические решения. Учитывая особенности восприятия зрительных образов и различный опыт будущих пользователей разрабатываемых решающих правил (гибридных диагностических моделей), каждый из шести типов эхографической текстуры представлен идеализированными обобщенными изображениями – реперами, отображающими эталонные эндосонограммы. Реперные схемы описываются экспертами следующим образом.

Репер 1. Эхографическая текстура нормальной ПЖ. Равномерно чередующимися линейные извитые гипо- и гиперэхогенные эхоструктуры, размеры которых не превышают 2 мм. Эхоструктуры ориентированы в различных направлениях относительно плоскости изображения (рис. 1).

Репер 2. Эхографическая текстура при ХП. Эхотекстуры внутри очага имеют преимущественно овальную форму. Эхоструктуры конгломерируются в очаги, превышающие 3 мм, формируя дольчатость строения железы, с чередованием изо- и гиперэхогенных участков, которые представляют собой отображение железистых фрагментов паренхимы ПЖ и участков фиброза. Лобулярные структуры хаотичны, границы между ними витееватой формы (рис. 2).

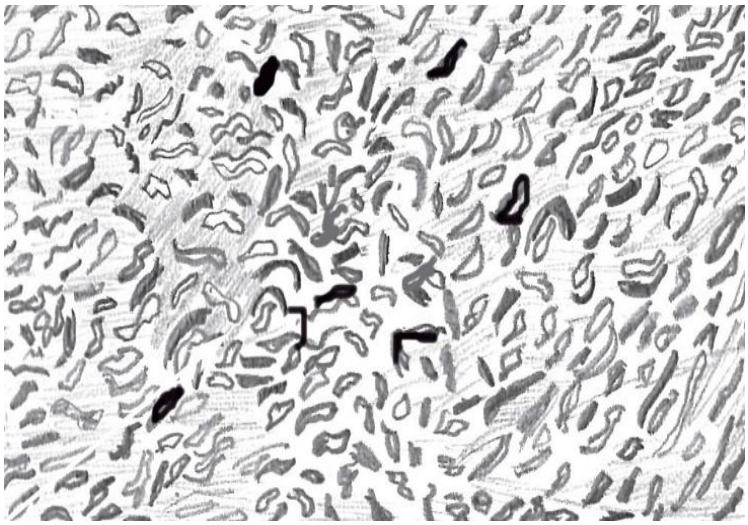

Рис. 1. Реперная схема эхографической текстуры нормальной поджелудочной железы

Fig. 1. Reference diagram of the echographic texture of the normal pancreas

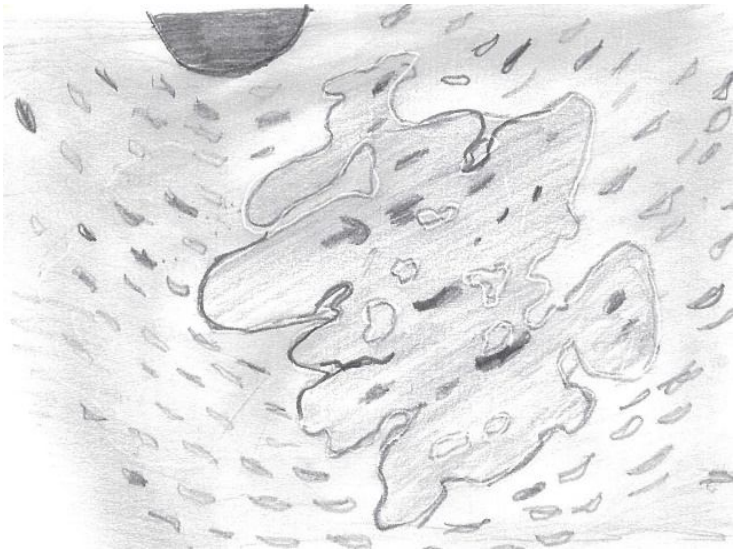

Рис. 2. Реперная схема эхографической текстуры при хроническом панкреатите

Fig. 2. Reference scheme of echographic texture in chronic pancreatitis

Репер 3. Эхографическая текстура при ХП с очаговым характером изменений. Характеризуется появлением на фоне дольчатого строения гипоэхогенных участков паренхимы с плавными контурами и формированием очага (рис. 3).

Репер 4. Эхографическая текстура при высокодифференцированных злокачественных новообразованиях ПЖ. Текстурный рисунок в очаге представлен овальными и округлыми эхоструктурами различных размеров с формированием гипоэхогенных областей. Границы гипоэхогенных областей в очаге нечеткие, относительно ровные. Соотношение размеров областей различной эхогенности равное (рис. 4).

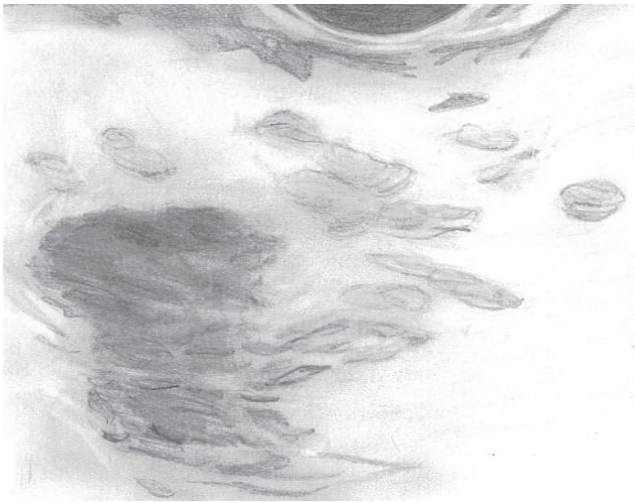

Рис. 3. Реперная схема эхографической текстуры при хроническом панкреатите с очаговым характером поражения

Fig. 3. Reference scheme of echographic texture in chronic pancreatitis with focal lesion

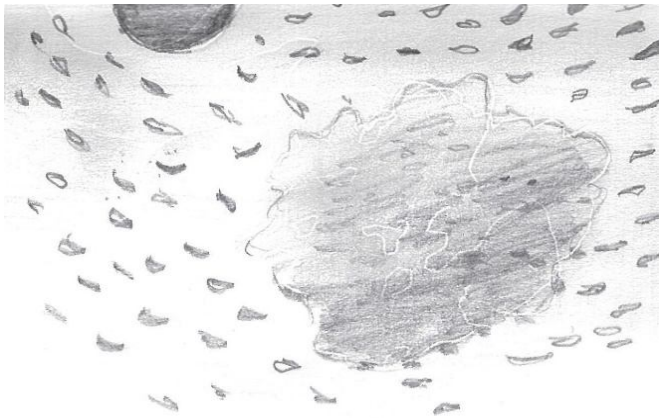

Рис. 4. Реперная схема эхографической текстуры при высокодифференцированных злокачественных новообразованиях поджелудочной железы

Fig. 4. Reference scheme of echographic texture in highly differentiated malignant neoplasms of the pancreas

Репер 5. Эхографическая текстура при умеренно дифференцированных злокачественных новообразованиях ПЖ. Текстурный рисунок в очаге представлен овальными и округлыми эхоструктурами различных размеров с формированием гипоэхогенных областей. Границы гипоэхогенных областей в пределах очага более четкие, имеют плавные округлые относительно ровные контуры. Отмечается преобладание гипоэхогенных областей в очаге (рис. 5).

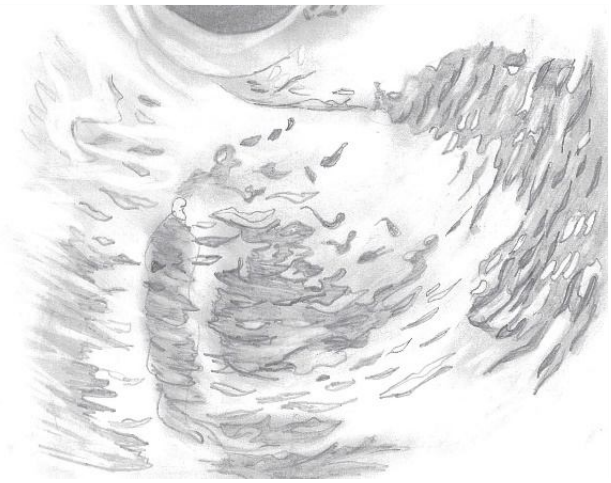

Рис. 5. Реперная схема эхографической текстуры при умеренно-дифференцированных злокачественных новообразованиях поджелудочной железы

Fig. 5. Reference scheme of echographic texture in moderately differentiated malignant neoplasms of the pancreas

Репер 6. Эхографическая текстура при низкодифференцированных злокачественных новообразованиях ПЖ. Текстурный рисунок в очаге нечеткий, эхоструктуры в очаге не дифференцируются. Формируются сливные гипоэхогенные области, которые занимают практически весь очаг с формированием однородной гипоэхогенной области (рис. 6).

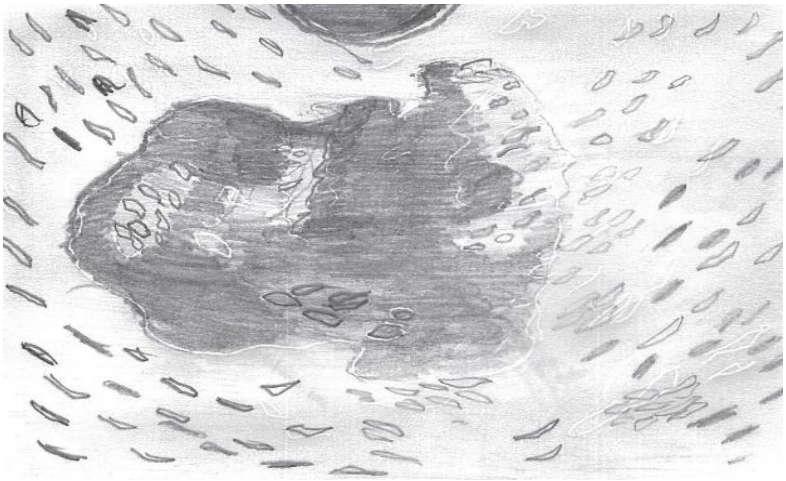

Рис. 6. Реперная схема эхографической текстуры при низкодифференцированных злокачественных новообразованиях поджелудочной железы

Fig. 6. Reference scheme of echographic texture in low-grade malignant neoplasms of the pancreas

В соответствии с общими рекомендациями МСГНРП для синтеза решающих правил дифференциальной диагностики очагового панкреатита и рака ПЖ под руководством инженера-когнитолога, имеющего опыт работы по синтезу гибридных нечётких решающих правил, формируется группа экспертов, обладающих компетенциями в области дифференциальной диагностики заболеваний ПЖ. Организуется их подготовка в области синтеза гибридных нечетких решающих правил. Количественный состав экспертной группы определяется требованиями, принятыми в квалиметрии, а их качественный состав корректируется с учетом коэффициента конкордации [11; 23; 24]. С учетом сложности и особенностей решаемой задачи количественный состав экспертной группы был определен в составе 8 человек. Далее, перед экспертами была поставлена задача для каждого из типовых эхотекстур определить коэффициенты уверенности в отнесении пациентов к одному из классов состояний: панкреатит – $\omega_П$, рак ПЖ – $\omega_Р$.

Результаты работы экспертов и усредненные результаты по исследуемым диагностическим классам приведены в таблицах 1 и 2.

По усредненным коэффициентам уверенности Кci в соответствии с рекомендациями [10; 11; 21; 22] построены два нечетких продукционных решающих правила вида:

ЕСЛИ (для ωП Ci) ТО $U_{\omega_П}$ = Кci. (1)

ЕСЛИ (для ωР.) ТО $U_{\omega_Р}$ = Кci. (2)

Принятие решения о принадлежности пациента к одному из исследуемых классов состояний осуществляется по максимальному значению U_{ω_ℓ}:

$$\Omega_\ell = \max\left\{U_{\omega_П}, U_{\omega_Р}\right\}. \qquad (3)$$

Таблица 1. Результаты опроса экспертов по классу $\omega_Р$

Table 1. Results of the survey of experts by class $\omega_Р$

Репер	С1	С2	С3	С4	С5	С6
Э1	0	0,20	0,40	0,62	0,72	0,80
Э2	0	0,20	0,50	0,65	0,75	0,82
Э3	0	0,25	0,45	0,55	0,55	0,75
Э4	0	0,15	0,48	0,48	0,60	0,85
Э5	0	0,10	0,50	0,65	0,70	0,82
Э6	0	0,15	0,40	0,58	0,65	0,80
Э7	0	0,12	0,48	0,55	0,70	0,85
Э8	0	0,15	0,45	0,55	0,70	0,78
Среднее	0	0,16	0,46	0,58	0,67	0,81

Примечание. $С_i$ – слайд с номером i; $Э_j$ – эксперт с номером j.

Таблица 2. Результаты опроса экспертов по классу $\omega_П$

Table 2. Results of the survey of experts by class $\omega_П$

Репер	С1	С2	С3	С4	С5	С6
Э1	0	0,85	0,62	0,60	0,50	0,32
Э2	0	0,90	0,65	0,62	0,55	0,25
Э3	0	0,82	0,60	0,55	0,45	0,30
Э4	0	0,85	0,72	0,70	0,40	0,15
Э5	0	0,90	0,70	0,60	0,35	0,15
Э6	0	0,90	0,70	0,55	0,48	0,10
Э7	0	0,82	0,65	0,62	0,40	0,15
Э8	0	0,75	0,62	0,70	0,35	0,15
Среднее	0	0,85	0,66	0,62	0,43	0,20

При равенстве $U_{\omega_П}$ и $U_{\omega_Р}$ на уровне 0,65 в связи со сходностью ультразвуковой эхосемиотики отнести патологию ПЖ к какому-либо из классов не представляется возможным, тем более что необходимо учесть возможность сочетания рака и хронического панкреатита.

В ходе математического моделирования и экспертного оценивания было установлено, что использование модели (3) для наиболее часто встречающихся текстурных «картин» без учета других особенностей анализируемых эндосонограмм обеспечивает уверенность в правильном принятии решений по клас-

су ω_P не ниже 0,35 и по классу $\omega_П$ не ниже 0,65.

Одной из причин снижения качества принимаемых решений по реперным схемам эхографической текстуры является наличие неопределенности в выборе врачом коэффициента уверенности для эхографических текстур, занимающих промежуточное положение между отобранными экспертами реперными картинками. Такая ситуация порождает «информационный» шум, аналогичный шуму квантования при переходе от непрерывных к дискретным сигналам.

Одним из способов повышения качества принимаемых решений в подобных ситуациях является использование дополнительных информативных признаков.

Наши исследования показали, что если патология, соответствующая описанным нами реперным изображениям, носит очаговый характер, то это увеличивает уверенность в правильной классификации по классу ω_P до 0,65.

Дополнительный учет анализируемых структур во взаимосвязи их отношения к протоковым системами печени и ПЖ, а также магистральным сосудам увеличивает диагностическую уверенность по классу $\omega_П$ до 0,82, а по классу ω_P – более 0,90.

Для подтверждения полученной точности классификации была сформирована контрольная выборка по 100 человек на каждый класс с подтверждёнными результатами обследований. При формировании типовых эхотекстур эксперты не рассматривали альтернативных вариантов относительно классов ω_P и $\omega_П$. Полученное решающее правило решает задачу разделения двух классов: рака ПЖ, который условно определен как основной класс и панкреатита как альтернативного по отношению к ω_P классу. В ходе контроля качества работы решающего правила (3) определялось количество ошибок, совершаемых этим правилом по пациентам имеющим исследуемую патологию (классы ω_P, $\omega_П$).

Результаты контрольных испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты срабатывания решающих правил

Table 3. The results of the operation of decision rules

Пациенты		Результаты наблюдения	
		Положительные	Отрицательные
Классы	$N_P = 100$	37	63
	$N_П = 100$	36	64

Примечание. N_P – количество пациентов класса ω_P; $N_П$ – количество пациентов класса $\omega_П$.

По результатам срабатывания решающих правил определялись такие показатели качества классификации, принятые в теории распознавания образов, как диагностическая специфичность (ДС), диагностическая чувствительность (ДЧ) и диагностическая эффективность (ДЭ) [11; 22; 25].

Из таблицы 3 следует, что показатель диагностической чувствительности, характеризующий качество срабатывания решающего правила (5) для класса ω_P, равен 0,37 (ДЧ = 0,37). Показатель диагностической специфичности, характеризующий качество срабатывания решающего правила (5) для класса $\omega_П$, равен 0,64 (ДС = 0,64). Для двух классов ДЭ = 0,5.

Приведенные результаты расчетов подтверждают результаты математического моделирования и экспертного оценивания.

Выводы

Полученные результаты свидетельствуют о том, что информация об эхографической текстуре эндосонограммы без дополнительных информативных признаков не может использоваться для надежной дифференциальной диагностики исследуемых классов патологии. Однако введенный показатель эхографической текстуры обладает достаточно высокой информативностью, что позволяет рекомендовать его для включения в состав гибридных нечетких решающих правил, обеспечивающих дифференциальную диагностику панкреатита и рака ПЖ с требуемой для медицинской практики точностью. Такой результат обеспечивается, если совместно с показателем эхографической текстуры в решающих правилах использовать ключевые эндосонографические характеристики очага: форму, размеры, эхогенность, гомогенность, характер и четкость контуров.

Список литературы

1. Krejs G. J. Pancreatic cancer: epidemiology and risk factors // Digestive Diseases 2010. N 28 (2). P. 355–358.

2. Возможности эндоскопической ультрасонографии в определении степени дифференцировки протоковой аденокарциномы поджелудочной железы / В. Г. Неустроев, Е. А. Ильичёва, Р. И. Расулов, А. А. Владимирова, В. А. Хмельницкая // Бюллютень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук. 2006. № 5 (51). С. 137–140.

3. Неустроев В. Г., Ильичева Е. И., Владимирова А. А. Эндоскопическая ультрасонография в дифференциальной диагностике хронического панкреатита и опухолей поджелудочной железы // Клиническая эндоскопия. 2007. № 3 (12). С. 31–43.

4. Информационные технологии в медицине: монография / А. А. Хадарцев [и др.]; Тульский государственный университет. Тула, 2006. 272 с.

5. Роль эндоскопии и эндоУЗИ в диагностике рака поджелудочной железы / К. В. Шишин, Е. В. Быстровская, И. Ю. Недолужко, Д. Д. Коваленко [и др.] // Анналы хирургической гепатологии. 2019. Т. 24, № 3. С. 36–43.

6. Hawes R. H., Fockens P. Endosonography. Amsterdam: Elsevier Inc., 2006. 329 p.

7. Impact of endoscopic ultrasonography on diagnosis of pancreatic cancer / M. Kitano, T. Yoshida, M. Itonaga [et al.] // J. Gastroenterol. 2019. N 54(1). P. 19–32.

8. Солодинина Е. Н. Эндоскопическое ультразвуковое исследование в диагностике хирургических заболеваний органов панкреатобилиарной зоны: дис. … д-ра мед. наук. М., 2016. 316 с.

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

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

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

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

13. Круглов В. В., Борисов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия – Телеком, 2002. 382 с.

14. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / пер. с польского Л. Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.

15. Падерно П. И. Надежность и эргономика биотехнических систем / под ред. Е. П. Попечителева. СПб.: Техномедиа, Элмор, 2007. 315 с.

16. Усков А. А., Кузьмин А. В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. М.: Горячая линия – Телеком, 2004. 143 с.

17. Хайкин С. Нейронные сети: Полный курс. 2-е изд., испр. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.

18. Korenevskiy N. A., Gorbatenko S. A., Krupchatnikov R. A., Lukasho M. I. Design of network-based fuzzy knowledge bases for medical decision-making support systems // Biomedical engineering. 2009. N 43 (4). P. 187–190.

19. Zadeh L. A. Advances in Fuzzy Mathematics and Engineering: Fuzzy Sets and Fuzzy Information-Granulation Theory. Beijing: Beijing Normal University Press, 2005. 256 p.

20. Количественная оценка ультразвукоового изображения / И. В. Клюшкин, А. Ю. Кинзерский, М. А. Кинзерская, Д. В. Пасынков // Казанский медицинский журнал. 2005. Т. 86, № 3. С. 237–240.

21. 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.

22. Прогнозирование и диагностика заболеваний, вызываемых вредными производственными и экологическими факторами на основе гетерогенных моделей / Н. А. Кореневский, Н. А. Серебровский, В. И. Коптева, Н. А. Говорухина. Курск: Изд-во Курск. гос. с.-х. акад., 2012. 231 с.

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

24. Филатова О. И., Кореневский Н. А. Метод синтеза комбинированных правил классификации и оценки уровня показателей, характеризующих функциональное состояние человека // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7, № 7. С. 160–164.

25. Кореневский Н. А., Юлдашев З. М. Проектирование биотехнических систем медицинского назначения. Общие вопросы проектирования: учебник. Старый Оскол: ТНТ, 2018. 312 с.

References

1. Krejs G. J. Pancreatic cancer: epidemiology and risk factors. *Digestive Diseases,* 2010, no. 28 (2), pp. 355–358.

2. Neustroev V. G., Il'ichyova E. A., Rasulov R. I., Vladimirova A. A., Hmel'nickaya V. A. Vozmozhnosti endoskopicheskoj ul'trasonografii v opredelenii stepeni differencirovki protokovoj adenokarcinomy podzheludochnoj zhelezy [Possibilities of endoscopic ultrasonography in determining the degree of differentiation of pancreatic ductal adenocarcinom] *Byullyuten' Vostochno-Sibirskogo nauchnogo tsentra Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk = Bulletin of the East Siberian Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Medical Sciences*, 2006, no. 5 (51), pp. 137–140. (In Russ.).

3. Neustroev V. G., Il'icheva E. I., Vladimirova A. A. Endoskopicheskaya ul'trasonografiya v differencial'noj diagnostike hronicheskogo pankreatita i opuholej podzheludochnoj zhelezy [Endoscopic ultrasonography in the differential diagnosis of chronic pan-

creatitis and pancreatic tumors]. *Klinicheskaya endoskopiya = Clinical Endoscopy,* 2007, no. 3 (12), pp. 31–43. (In Russ.)

4. Hadarcev A. A., eds. Informacionnye tekhnologii v medicine [Information technologies in medicine]. Tula, Tula st. Univ. Publ., 2006, 272 p. (In Russ.)

5. Shishin K. V., Bystrovskaya E. V., Nedoluzhko I. Yu., Kovalenko D. D., eds. Rol' endoskopii i endo-UZI v diagnostike raka podzheludochnoj zhelezy [The role of endoscopy and endo-ultrasound in the diagnosis of pancreatic cancer]. *Annaly hirurgicheskoj gepatologii = Annals of Surgical Hepatology*, 2019, vol. 24, no. 3, pp. 36-43. (In Russ.).

6. Hawes R. H., Fockens P. Endosonography. Amsterdam, Elsevier Inc. Publ., 2006. 329 p.

7. Kitano M., Yoshida T., Itonaga M., eds. Impact of endoscopic ultrasonography on diagnosis of pancreatic cance. *J. Gastroenterol*, 2019, vol. 54, no. 1, pp. 19–32.

8. Solodinina E. N. Endoskopicheskoe ul'trazvukovoe issledovanie v diagnostike hirurgicheskih zabolevanij organov pankreatobiliarnoj zonyю Diss. kand. med. nauk [Endoscopic ultrasound examination in the diagnosis of surgical diseases of the pancreatobiliary zone. Dr. med. sci. diss.]. Moscow, 2016. 316 p. (In Russ.).

9. Voroncov I. M., Shapovalov V. V., Sherstyuk Y. M. Zdorov'e. Opyt razrabotki i obosnovanie primeneniya avtomatizirovannyh sistem dlya monitoringa i skriniruyushchej diagnostiki narushenij zdorov'ya [Health. Experience in developing and justifying the use of automated systems for monitoring and screening diagnostics of health disorders]. St. Petersburg, Costa Publ., 2006. 432 p. (In Russ.).

10. Korenevskij N. A. Ispol'zovanie nechetkoj logiki prinyatiya reshenij dlya medicinskih ekspertnyh sistem [Using fuzzy decision logic for medical expert systems]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Equipment,* 2015, no. 1, pp. 33–35. (In Russ.).

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

12. Korenevskij N. A. Proektirovanie nechetkih reshayushchih setej, nastraivaemyh po strukture dannyh dlya zadach medicinskoj diagnostiki [Design of fuzzy decision networks, configurable by data structure for medical diagnostics tasks]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = Systems Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2005, vol. 4, no. 1, pp. 12–20. (In Russ.).

13. Kruglov V. V., Borisov V. V. Iskusstvennye nejronnye seti. Teoriya i praktika [Artificial neural networks. Theory and practice]. Moscow, Hotline-Telecom Publ., 2002. 382 p. (In Russ.)

14. Osovskij S. Nejronnye seti dlya obrabotki informacii [Neural networks for information processing]; ed. by L. D. Rudinskiy. Moscow, Finance and statistics Publ., 2002. 344 p. (In Russ.)

15. Paderno P. I. Nadezhnost' i ergonomika biotekhnicheskih sistem [Reliability and ergonomics of biotechnical systems]; ed. by P. Popechitelev. St. Petersburg, Tekhnomedia Publ., Elmor Publ., 2007. 315 p. (In Russ.)

16. Uskov A. A., Kuz'min A. V. Intellektual'nye tekhnologii upravleniya. Iskusstvennye nejronnye seti i nechetkaya logika [Intelligent management technologies. Artificial neural networks and fuzzy logic]. Moscow, Hotline-Telecom Publ., 2004. 143 p. (In Russ.)

17. Hajkin S. Nejronnye seti: Polnyj kurs [Neural Networks: A Complete Course]. 2th ed. Moscow, Williams Publ., 2006. 1104 p. (In Russ.)

18. Korenevskiy N. A., Gorbatenko S. A., Krupchatnikov R. A., Lukasho M. I. Design of network-based fuzzy knowledge bases for medical decision-making support systems. *Biomedical engineering*, 2009, no. 43 (4), pp. 187–190.

19. Zadeh L. A. Advances in fuzzy mathematics and engineering : fuzzy sets and fuzzy information-granulation theory. Beijing, Beijing, Normal University Press, 2005. 256 p.

20. Klyushkin I. V., Kinzerskij A. Yu., Kinzerskaya M. A., Pasynkov D. V. Kolichestvennaya ocenka ul'trazvukoovogo izobrazheniya [Quantitative evaluation of the ultrasound image]. *Kazanskij medicinskij zhurnal = Kazan Medical Journal,* 2005, vol. 86, no. 3, pp. 237–240. (In Russ.).

21. Korenevsky N. A. Method of synthesis of heterogeneous fuzzy rules for analysis and control of the state of biotechnical systems [Method of synthesis of heterogeneous fuzzy rules for analysis and control of the state of biotechnical systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation*, 2013, vol. 2, pp. 99–103. (In Russ.).

22. Korenevskij N. A., Serebrovskij N. A., Kopteva V. I., Govoruhina T. N. Prognozirovanie i diagnostika zabolevanij, vyzyvaemyh vrednymi proizvodstvennymi i ekologicheskimi faktorami na osnove geterogennyh modelej [Prediction and diagnosis of diseases caused by harmful industrial and environmental factors based on heterogeneous models]. Kursk, Kursk st. agricultural Acad. Publ., 2012. 231 p. (In Russ.)

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

24. Filatova O. I., Korenevskij N. A. Metod sinteza kombinirovannyh pravil klassifikacii i ocenki urovnya pokazatelej, harakterizuyushchih funkcional'noe sostoyanie cheloveka [The method of synthesis of combined rules of classification and assessment of the level of indicators characterizing the functional state of a person]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2011, vol. 7, no. 7, pp. 160–164. (In Russ.)

25. Korenevskij N. A., Yuldashev Z. M. Proektirovanie biotekhnicheskih sistem medicinskogo naznacheniya. Obshchie voprosy proektirovaniya [Design of biotechnical systems for medical purposes. General design issues]. Stary Oskol., TNT Publ., 2018. 312 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Белозеров Владимир Анатольевич, кандидат медицинских наук, врач отделения эндоскопии, БМУ «Курская областная клиническая больница», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: b9102107495@yandex.ru

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

Vladimir A. Belozerov, Cand. of Sci. (Medical), Doctor of the Endoscopy Department, Kursk Regional Clinical Hospital, Kursk, Russian Federation, e-mail: b9102107495@yandex.ru

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

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311

Моделирование спектров высших гармоник в системах электроснабжения

В. И. Бирюлин[1], Е. И. Грачева[2], Д. В. Куделина[1], А. О. Танцюра[1] ✉

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

[2] Казанский государственный энергетический университет
ул. Красносельская 51, г. Казань, 420066, Российская Федерация

✉ e-mail: mary_joy@mail.ru

Резюме

Цель исследования. *Электрическая энергия, как и любая другая товарная продукция, должна иметь соответствующее качество, определяемое соответствующими характеристиками или же показателями качества электроэнергии. Эти показатели должны находиться в заданных границах, чтобы обеспечивать нормальную работу электрооборудования и электроприемников. Числовые значения показателей качества электрической энергии зависят от многих факторов, в том числе и от характера потребителей электроэнергии. Быстрое развитие электронной техники сопровождается широким внедрением в различные электроприемники тех или иных электронных схем, в том числе и преобразователей, например, для питания светодиодных светильников. Это неизбежно приводит к появлению в электрической сети напряжений и токов с частотами, отличающимися от номинального значения 50 Гц или же высших гармоник и искажающими синусоидальную форму тока и напряжения в электросетях. Возникновение высокого уровня высших гармоник негативно сказывается на работу электрических сетей и электроприемников.*

Цель исследования – разработка математической модели, обеспечивающей нахождение значений токов высших гармоник и оценку их негативного влияния на примере силового кабеля.

Задачи: изучить режимы работы светодиодных светильников, широко применяемых в системах освещения; найти зависимости между номерами гармоник токов и их значениями; разработать модель определения потерь мощности в токоведущих жилах силового кабеля.

Методы*. В работе использовались методы теоретической электротехники. Математические зависимости получены с применением компьютерной системы научно-технических расчетов MatLab.*

Результаты*. Полученные результаты позволяют оценивать влияние на элементы электрической сети токов высших гармоник, создаваемых светодиодными светильниками. Показано, что при работе светодиодных светильников нечетные гармоники значительно превосходят по своему уровню четные.*

Заключение*. Применение результатов работы способствует определению потерь мощности в кабельных линиях при несинусоидальных токах и нагрева изоляции при таких токах.*

Ключевые слова*: качество; электроэнергия; показатели; высшие гармоники; компьютерное моделирование; ток; напряжение; электрическая сеть; светодиодные светильники.*

© Бирюлин В. И., Грачева Е. И., Куделина Д. В., Танцюра А. О., 2020

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

Для цитирования: Моделирование спектров высших гармоник в системах электроснабжения / В. И. Бирюлин, Е. И. Грачева, Д. В. Куделина, А. О. Танцюра // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 136–150.

Поступила в редакцию 09.07.2020 *Подписана в печать 07.08.2020* *Опубликована 30.11.2020*

High Harmonics Spectra Modeling in Power Supply Systems

Vladimir I. Biryulin[1], Elena I. Gracheva[2], Daria V. Kudelina[1], Anton O. Tantsyura[1] ✉

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

[2] Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya str., Kazan 420066, Russian Federation

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Abstract

***Purpose of research.** Electric energy, like any other commercial product, must have an appropriate quality, determined by the corresponding characteristics or indicators of the quality of electricity. These indicators must be within the specified limits in order to ensure the normal operation of electrical equipment and electrical consumers. Numerical values of indicators of the quality of electrical energy depend on many factors, including the nature of electricity consumers. The rapid development of electronic technology is accompanied by the widespread introduction of various electronic circuits into various electrical receivers, including converters, for example, for powering LED lamps. This inevitably leads to the appearance in the electrical network of voltages and currents with frequencies that differ from the nominal value of 50 Hz or higher harmonics, and distort the sinusoidal form of current and voltage in the electrical networks. The occurrence of a high level of higher harmonics negatively affects the operation of electrical networks and electrical receivers.*

The purpose of the research to develop a mathematical model that provides finding the values of higher harmonic currents and assessing their negative impact on the example of a power cable.

Objectives: to study the modes of operation of LED lamps, widely used in lighting systems; to find the relationship between the numbers of harmonics of currents and their values; to develop a model for determining the power losses in the current-carrying conductors of a power cable.

***Methods.** The work used the methods of theoretical electrical engineering. Mathematical dependencies were obtained using the computer system of scientific and technical calculations MatLab.*

***Results.** The results obtained make it possible to evaluate the effect on the elements of the electrical network of the higher harmonic currents generated by LED lamps. It is shown that when LED luminaires operate, odd harmonics significantly exceed even ones in their level.*

***Conclusion.** Application of the results of the work contributes to the determination of power losses in cable lines at non-sinusoidal currents and insulation heating at such currents.*

***Keywords:** quality; electricity; indicators; higher harmonics; computer simulation; current; voltage; electrical network; LED lamps.*

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

For citation: Biryulin V. I., Gracheva E. I., Kudelina D. V., Tantsyura A. O. High Harmonics Spectra Modeling in Power Supply Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(3/4): 136–150. (In Russ.)

Received 09.07.2020 *Accepted 07.08.2020* *Published 30.11.2020*

Введение

Уже достаточно давно электрическая энергия (ЭЭ) представляет собой товарную продукцию со всеми ее типичными свойствами. Поэтому, как и по другим видам товаров, по ЭЭ должны обеспечиваться определенные требования по выполнению нормативных требований к качеству ЭЭ (КЭЭ), потому что только в случае соблюдения КЭЭ существуют нормальные условия для работы электрооборудования электроэнергетических систем, например силовых трансформаторов, а также самых различных электроприемников (ЭП) у потребителей ЭЭ. Поэтому поддержание качества ЭЭ в пределах, установленных нормативными документами, входит в круг наиболее приоритетных задач при работе электроэнергетических систем.

Определяется КЭЭ как степень соответствия определенных характеристик электроэнергии в точках передачи ЭЭ или показателей качества электроэнергии (ПКЭ) потребителям электроэнергии, подключенных к электрическим сетям переменного тока различного класса напряжения с номинальной частотой, равной 50 Гц [1]. Согласно [1] эти точки представляют собой точки электрической сети, находящиеся на линии разделения объектов электроэнергетики между собственниками по признаку принадлежности или же владения (границы балансового раздела), определенной в процессе технологического присоединения к электрическим сетям.

Значения ПКЭ определены для характеристик напряжения электрической сети, по ним оценивается КЭЭ по следующим величинам этих характеристик:

– частота переменного тока;

– значения напряжения фаз сети, как за длительные периоды времени, так и за кратковременные;

– искажения синусоидальной формы напряжения;

– симметрия фазных и междуфазных напряжений при рассмотрении трехфазных систем электроснабжения [1; 2].

Эти характеристики напряжения при работе систем электроснабжения в различной степени изменяются под действием различных факторов, например, суточных или сезонных изменений нагрузок потребителей, изменений схем систем электроснабжения, распространением электромагнитных помех, со-

здаваемых при коммутациях электрооборудования, или же под влиянием атмосферных перенапряжений, а также других причин.

В результате из-за перечисленных факторов возникают случайные по своей природе изменения характеристик напряжения или ПКЭ в произвольный момент времени. Это может происходить в любой, произвольно выбранной для рассмотрения точке электрической сети, в том числе и где происходит передача электрической энергии от энергоснабжающей организации пользователям электроэнергии.

Материалы и методы

В последнее время вопросы поддержания в заданных пределах КЭЭ стали очень актуальными, что обусловлено ростом использования ЭП с нелинейными вольт-амперными характеристиками, внедрением различных цифровых устройств для информатизации и автоматизацией многих процессов в высокотехнологических производствах.

Такие потребители при своей работе создают искажения синусоидальной формы кривых тока и напряжения. Эти искажения сопровождаются возникновением в электрических сетях токов и напряжений с частотами, кратными значению основной частоты – 50 Гц или высших гармоник. При большом количестве таких потребителей происходит снижение КЭЭ ниже допустимых пределов. Это приводит к стремительному росту ущерба потребителей из-за низкого КЭЭ [3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10].

Искажение кривых напряжения и тока в электрической сети при работе нелинейных потребителей подтверждается также результатами измерений высших гармоник напряжения и тока, выполненных авторами статьи, при исследовании режимов работы двух светодиодных светильников портативным анализатором качества электроэнергии CIRCUTOR серии AR.5.

Результаты и их обсуждение

Для примера ниже приводятся результаты этих измерений, полученные после обработки данных программным обеспечением POWERVISION. Эти результаты представлены в графическом виде (рис. 1–4). Рисунок 1 представляет формы графиков напряжения на вводе первого светильника и тока в линии, питающей этот светильник. Вверху показана кривая напряжения, внизу – кривая тока.

Как видно по кривым напряжения и тока, наличие электронного преобразователя в светодиодном светильнике приводит к существенным искажениям синусоиды, как для напряжения, так и для тока. Дополнительно на графиках приводятся суммарные коэффициенты гармонических оставляющих напряжения сети (THD = 7,4%) и тока линии (THD = 15,6%). В нашей стране этот коэффициент нормируется для напряжения (K_U), допустимое значение K_U не должно превышать величины 12% за весь период проведения измерений [1].

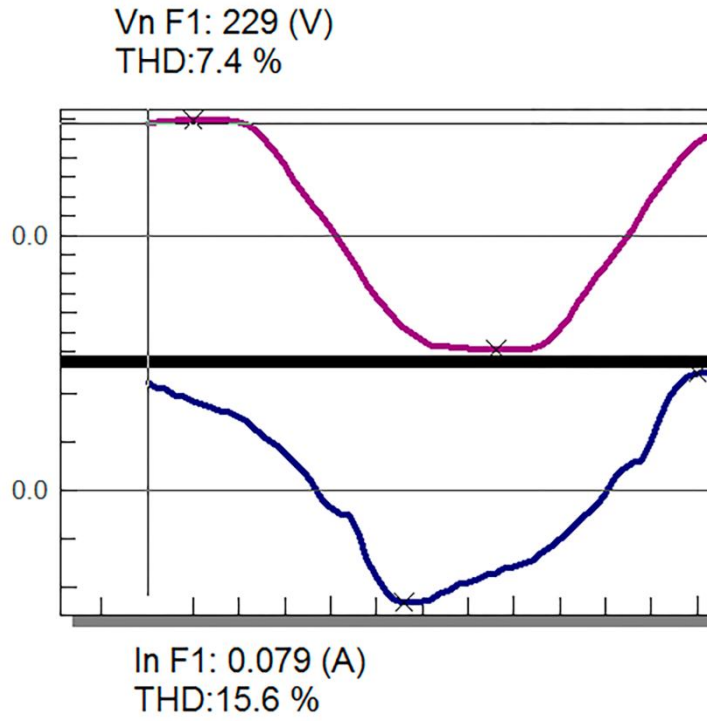

Рис. 1. Кривые напряжения и тока светодиодного светильника

Fig. 1. Curves of voltage and current of a LED lamp

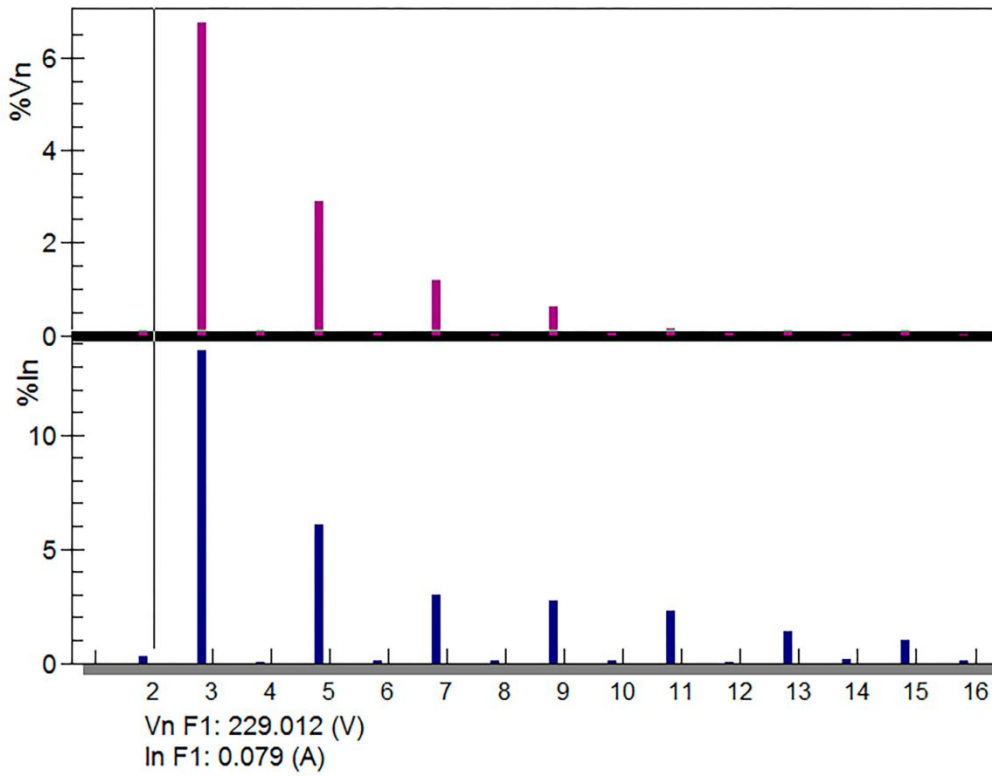

Рис. 2. Спектральный состав напряжения и тока светодиодного светильника

Fig. 2. Spectral composition of voltage and current of the LED lamp

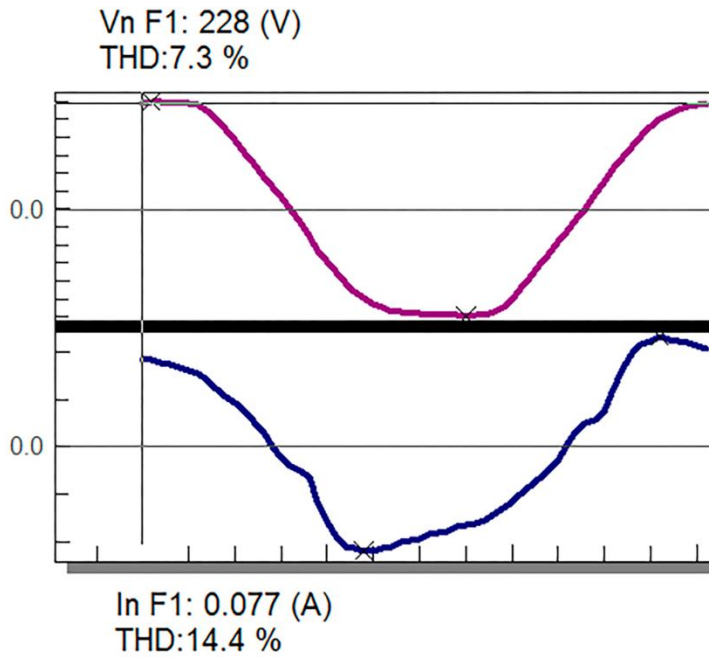

Рис. 3. Кривые напряжения и тока светодиодного светильника

Fig. 3. Curves of voltage and current of a LED lamp

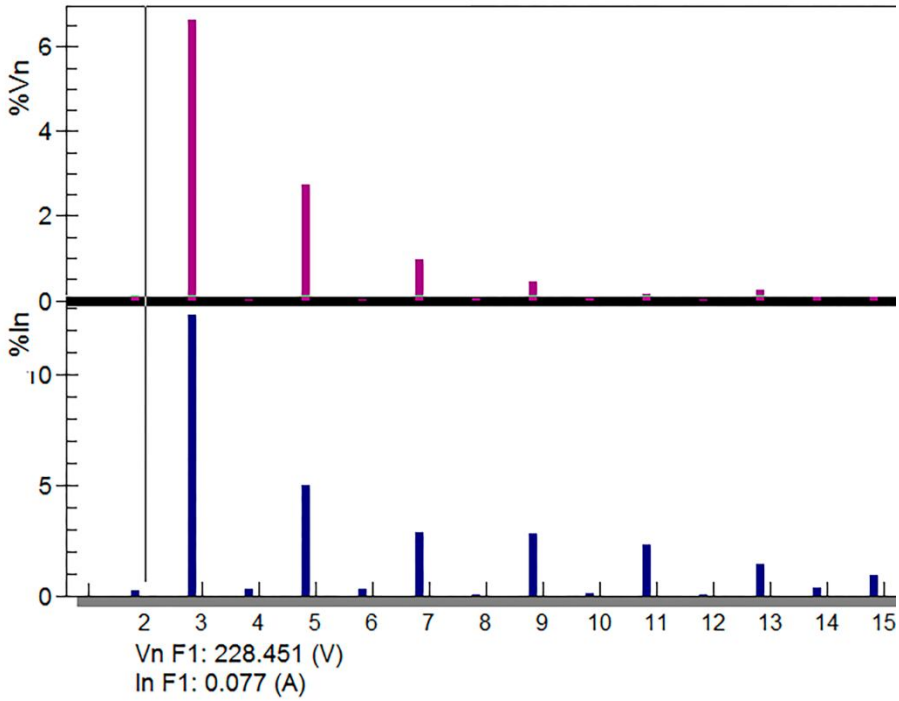

Рис. 4. Спектральный состав высших гармоник напряжения и светодиодного светильника

Fig. 4. Spectral composition of higher harmonics of voltage and LED luminaire

Также хорошо заметно искажение формы кривой тока, и, как следствие этого, значение суммарного коэффициента гармонических составляющих тока равняется 15,6%. Это довольно высокое значение, хотя этот показатель для тока

не определяется в нормативных документах.

На рисунке 2 приведены спектральные составы гармоник напряжения (верх) и тока (низ) для этого же светильника или зависимости уровня соответствующей гармонической составляющей напряжения или тока от номера этой составляющей (показывающего, во сколько раз частота этой составляющей выше, чем нормативное значение частоты в электрической сети, равное 50 Гц). При анализе этих спектральных составов обращает внимание преобладание третьей гармоники, как в спектре напряжения, так и в спектре тока.

На рисунке 3 приведены кривые напряжения и тока для другого светодиодного светильника.

На рисунке 4 приведен спектральный состав высших гармоник напряжения и тока другого светодиодного светильника.

Появление высших гармоник тока и напряжения создает негативные последствия, как для электрических сетей, так и для электроприемников потребителей [11; 12; 13]. Поэтому для снижения вредного влияния высших гармоник используются различные мероприятия [14; 15; 16].

Оценивать эффективность мероприятий по компенсации высших гармоник тока целесообразно на основе использования математической модели, описывающей спектр высших гармоник тока. Известна работа [17], в которой для составления математической модели спектра высших гармоник тока используются вейвлеты, позволяющие получать хорошие результаты в таких случаях. Но их применение достаточно трудоемко, что затрудняет задачу составления моделей спектра высших гармоник тока многочисленных в настоящее время нелинейных электроприемников, создающих значительные искажения синусоидальной формы тока [18; 19; 20].

Рассмотрим использование для этой цели полиномов различных степеней. С этой целью представим спектры гармоник первого и второго светильников (табл. 1 и 2).

Таблица 1. Спектр высших гармоник тока первого светодиодного светильника

Table 1. Spectrum of higher harmonics of the current of the first LED luminaire

№ гармоники Harmonic N	Гармоники, % Harmonics, %
2	0,180
3	13,714
4	0,029
5	6,128
6	0,101
7	2,918
8	0,152
9	2,655
10	0,087
11	2,441
12	0,075
13	1,237
14	0,130
15	1,043

Таблица 2. Спектр высших гармоник тока второго светодиодного светильника

Table 2. Spectrum of higher harmonics of the current of the second LED luminaire

№ гармоники Harmonic N	Гармоники, % Harmonics, %
2	0,234
3	12,704
4	0,258
5	4,996
6	0,312
7	2,844
8	0,040
9	2,805
10	0,097
11	2,299
12	0,056
13	1,386
14	0,320
15	0,896

При анализе графического и табличного представления спектров можно легко сделать вывод, что уровень четных гармоник тока заметно меньше, чем уровень нечетных гармоник. Поэтому из дальнейшего рассмотрения четные гармоники исключаем и работаем только с нечетными гармониками.

Непосредственный поиск полиномов для математической модели спектра высших гармоник выполняем в компьютерной системе научно-технических расчетов MatLab. Для этой цели составляем векторы, содержащие номера и значения гармоник тока. Затем на основании этих векторов и задаваемой степени полинома применением функции polyfit() находим коэффициенты искомого полинома.

Для максимального приближения к исходным данным использовались полиномы различных степеней – от второй до пятой. Наилучшие результаты были получены с полиномом пятой степени. Его коэффициенты для первого светодиодного светильника имеют следующий вид: a_5 = 0,0000; a_4 = 0,0022; a_3 = –0,0395; a_2 = 0,3325; a_1 = –1,3218; a_0 = 2,0236.

Учитывая величину коэффициента при пятой степени, такой полином, по существу, имеет четвертую степень. Но полином, который сразу задавался четвертой степенью, показал результаты хуже при проверке его работы, чем такой полином пятой степени.

Для иллюстрации: значение третьей гармоники тока, согласно полученному полиному, составляет 15,29% – экспериментально полученное значение 13,71%, для девятой гармоники расчетное значение составляет 3,26% – экспериментально полученное значение 2,65%.

Далее рассмотрим, как можно использовать полученные зависимости для определения нагрева силовых кабелей в электрических сетях. Этот нагрев создается потерями активной мощности от протекания токов основной гармоники и высших гармоник.

В общем случае значение суммы потерь активной мощности в силовом кабеле многофазной электрической сети при протекании в нем тока определяется исходя из закона Джоуля – Ленца. При прохождении по токоведущим жилам кабеля тока с формой, отличной от синусоидальной, создаются потери мощности, суммарное значение которых можно определить следующим образом:

$$P_{\sum}^{\text{фазн}} = I_1^2 \cdot R_1 + \sum_{n=2}^{40} I_n^2 \cdot R_n, \qquad (1)$$

где I_1 …. I_n – токи в кабеле, частотой от 50 Гц до сороковой гармоники или 2000 Гц [1], R_1 и R_n – значения активных сопротивлений токопроводящих жил кабеля также от частоты 50 Гц до сороковой гармоники тока.

Если кабель имеет конструкцию с тремя фазными жилами и нулевой жилой (применение в системах *TN* и *TT* электрических сетей напряжением 0,4 кВ), то в нулевой жиле кабеля при наличии токов третьей гармоники и кратных ей появляются дополнительные потери мощности. Значение этих потерь рассчитываются как

$$P_{\sum}^{\text{нул}} = 3 \cdot \sum_{n=3,9,15...} I_n^2 \cdot R_n, \qquad (2)$$

где I_n – значение суммарного тока в нулевой жиле от гармоник, кратных трем.

В фазных жилах кабеля суммарные потери при несинусоидальной форме тока ($P_{\sum}^{\text{фазн}}$) можно найти в виде сумму отдельных потерь мощности на частоте 50 Гц (основная частота или первая гармоника) и на частотах высших гармониках тока:

$$P_{\sum}^{\text{фазн}} = P_1^{\text{фазн}} + \sum_{n=2}^{40} P_n^{\text{фазн}} = I_1^2 \cdot R_1 + \sum_{n=2}^{40} I_n^2 \cdot R_n, \qquad (3)$$

где n – номер гармоники тока.

Значения токов высших гармоник, проходящих по проводникам, целесообразно представлять в относительных единицах (процентах) от величины тока первой гармоники (50 Гц), в этом случае упрощается использование спектров высших гармоник. Такие относительные единицы, представляющие токи высших гармоник, обозначим как K_{In}.

Исходя из этого составляющие суммы в формуле (3) можно выразить через соответствующие коэффициенты K_{In} и эта формула примет следующий вид:

$$P_{\sum}^{\text{фазн}} = I_1^2 \cdot R_1 + \\ + \sum_{n=2}^{40} \left(K_{I_n} \cdot I_1\right)^2 \cdot R_1 \cdot \left(0{,}187 + 0{,}532 \cdot \sqrt{n}\right). \qquad (4)$$

После ряда преобразований предыдущая формула примет следующий вид:

$$P_{\sum}^{\text{фазн}} = I_1^2 \times \\ \times R_1 \left(1 + \sum_{n=2}^{40} \left(K_{I_n}\right)^2 \cdot A_n + \sum_{m=m1}^{m2} \left(K_{I_m}\right)^2 \cdot A_m\right), \qquad (5)$$

где $A_n = 0{,}187 + 0{,}532 \cdot \sqrt{n}$.

Выводы

Приведенные результаты показывают возможность использования значений токов высших гармоник с нечетными номерами при исследовании влияния нелинейной нагрузки на элементы электрических сетей, в первую очередь, на силовые кабели. Это влияние проявляется в возникновении добавочных потерь активной мощности в токоведущих жилах кабелей, что создает, в свою очередь, дополнительный нагрев изоляции, приводящий к снижению срока ее службы. Также показано нахождение зависимости между номером нечетной высшей гармоники и значением ее тока по экспериментальным данным, полученными авторами статьи.

Список литературы

1. Семёнов А. С., Бондарев В. А., Заголило С. А. Контроль качества электроэнергии и анализ полученных результатов при измерении напряжения // Фундаментальные исследования. 2017. № 9-1. С. 86–92. DOI: 10.17513/fr.41709.

2. Наумов А. А. Обеспечение требуемого качества электрической энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 1. С. 85–92. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92.

3. Дед А. В., Сикорский С. П., Смирнов П. С. Результаты измерений показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий и организаций // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 60–64. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-60-64.

4. Исследование высших гармоник в электрических сетях низкого напряжения / Д. Ю. Руди, А. И. Антонов, М. Г. Вишнягов, С. В. Горелов, Д. А. Зубанов, А. А. Руппель, Е. Ю. Руппель // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 119–125. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-119-125.

5. Ольховский В. Я., Мятеж Т. В., Наяксов С. Ю. Исследование воздействия высших гармоник мелких нелинейных потребителей на работу сети до 1000 В // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2016. №1 (30). С. 84–97. DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-84-97.

6. Коверникова Л. И., Льонг В. Ч., Нго В. К. Особенности параметров режимов гармоник в узде присоединения целлюлозно-бумажного комбината к питающей сети // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2020. 13(1). С. 38–51. DOI: 10.17516/1999-494X-0204.

7. Викторов В. А., Мешалкин В. А., Салтыков В. М. Исследование уровней и спектров высших гармоник тока в электрических сетях питания компьютерной техники и основные мероприятия по обеспечению электромагнитной совместимости // Системы

управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 381–402. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10415.

8. High frequency harmonic distortions measured in a Brazilian solar farm / R. Torquato, W. Freitas, G. R. T. Hax, A. R. Donadon, R. Moya // 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2016. doi: 10.1109/ICHQP.2016.7783482.

9. Propagation characteristics of high-frequency harmonics in distribution systems / R. Torquato, W. Xu, W. Freitas, J. Lepka, R. Pascal // IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016. doi: 10.1109/PESGM.2016.7741220.

10. The On-site Measurement Research of Converter Transformer Harmonic Losses Based on Harmonic Power Source / JIA Pengfei, ZHANG Shuqi, YU Xinru, WU Chao, GUAN Jianxin // IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2018. doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642022.

11. Зацепина В. И., Зацепин Е. П., Скоморохов П. И. Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения посредством комбинированного воздействия на искажения напряжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21, № 5. С. 81–88. doi: 10.30724/1998-9903-2019-21-5-79-86.

12. Analysis of High Frequency Harmonics in Distribution Networks: 9 – 150 kHz / J. Yaghoobi, F. Zare, T. Rehman, H. Rathnayake // IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Saratov, 2019. DOI: 10.1109/ICIT.2019.8755071.

13. Song W., Fang J., Jiang Z. Numerical AC loss analysis in HTS stack carrying non-sinusoidal transport current // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2019. vol. 29, no. 2. DOI: 10.1109/TASC.2018.2882066.

14. AC Loss Effect of High-Order Harmonic Currents in a Single-Phase 6.5 MVA HTS Traction Transformer / Wenjuan Song, Jin Fang, Zhenan Jiang, Mike Staines, Rodney Badcock // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2019. Vol. 29, is. 5. DOI: 10.1109/TASC.2019.2901014.

15. Коваленко Д. В., Киселёв Б. Ю., Плотников Д. И. Методика расчета пассивных фильтров, предназначенных для компенсации высших гармоник тока в системах электроснабжения промышленных предприятий // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 1 (55), ч. 4. С. 82–86. DOI: 10.23670/IRJ.2017.55.093.

16. Дворкин Д. В., Силаев М. А., Тульский В. Н. Проблемы оценки вклада потребителя в искажение качества электроэнергии // Электричество. 2017. № 7. С. 12–19. DOI: 10.24160/0013-5380-2017-7-12-19.

17. Файфер Л. А., Осипов Д. С., Еремин Е. Н. Применение пакетного вейвлет-преобразования для определения составляющих мощности при несинусоидальных режимах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 8 (115). С. 136–145. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-8-136-145.

18. Biryulin V. I., Kudelina D. V., Larin O. M. Electricity quality problems in the 0.4 kv city electric networks // International Conference on Industrial Engineering, Application and Manufacturing, ICIEAM-2020: collection of materials. Chelyabinsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. Doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112048.

19. Biryulin V. I., Gorlov A. N., Kudelina D. V. Calculation of cable lines insulation heating with the account of high harmonics currents Proceedings – 2018 // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM-2018. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728688.

20. Biryulin V. I., Gorlov A. N., Kudelina D. V. Modeling cable lines heating by currents of higher harmonics and interharmonics 2019 // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM-2019. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019. 8743089.

References

1. Semyonov A. S., Bondarev V. A., Zagolilo S. A. Kontrol' kachestva elektroenergii i analiz poluchennykh rezul'tatov pri izmerenii napryazheniya [Power quality control and analysis of the results obtained when measuring voltage]. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental research*, 2017, no. 9-1, pp. 86–92. (In Russ.) doi: 10.17513 / fr.41709

2. Naumov A. A. Obespechenie trebuemogo kachestva elektricheskoi energii [Ensuring the required quality of electrical energy]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki = Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy Problems*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 85–92. (In Russ.) doi: 10.30724 / 1998-9903-2020-22-1-85-92

3. Ded A.V., Sikorskiy S. P., Smirnov P. S. Rezul'taty izmerenii pokazatelei kachestva elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya predpriyatii i organizatsii [Results of measurements of power quality indicators in power supply systems of enterprises and organizations]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2018, no. 2 (158), pp. 60–64. (In Russ.) doi: 10.25206/1813-8225-2018-158-60-64

4. Rudi D. Yu., Antonov A. I., Vishnyagov M. G., Gorelov S. V., Zubanov D. A., Ruppel A. A., Ruppel E. Yu. Issledovanie vysshikh garmonik v elektricheskikh setyakh nizkogo napryazheniya [Research of higher harmonics in low voltage electrical networks]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2018, no. 6 (162), pp. 119–125. (In Russ.) doi: 10.25206/1813-8225-2018-162-119-125

5. Olkhovsky V. Ya., Matezh T. V., Nayaksov S. Yu. Issledovanie vozdeistviya vysshikh garmonik melkikh nelineinykh potrebitelei na rabotu seti do 1000 V [Investigation of the impact of higher harmonics of small nonlinear consumers on network operation up to 1000 V]. *Reports of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation =*

Reports of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation, 2016, no. 1 (30), pp. 84–97. (In Russ.) doi: 10.17212/1727-2769-2016-1-84-97

6. Kovernikova L. I., Leung V. Ch., Ngo V. K. Osobennosti parametrov rezhimov garmonik v uzde prisoedineniya tsellyulozno-bumazhnogo kombinata k pitayushchei seti [Features of the parameters of harmonics modes in the bridle of connecting the pulp and paper mill to the power supply network]. *Zhurnal sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Journal of the Siberian Federal University. Technics and Technology*, 2020, no. 13 (1), pp. 38–51. (In Russ.) doi: 10.17516/1999-494X-0204

7. Viktorov V. A., Meshalkin V. A., Saltykov V. M. Issledovanie urovnei i spektrov vysshikh garmonik toka v elektricheskikh setyakh pitaniya komp'yuternoi tekhniki i osnovnye meropriyatiya po obespecheniyu elektromagnitnoi sovmestimosti [The research of the levels and spectra of higher harmonics of current in electrical power networks of computer equipment and the basic activities of the electromagnetic compatibility provision]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 4, pp. 381–402. (In Russ.) doi: 10.24411/2410-9916-2019-10415

8. Torquato R., Freitas W., HaxG. R. T., Donadon A. R., Moya R. High frequency harmonic distortions measured in a Brazilian solar farm. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2016. doi: 10.1109/ICHQP.2016.7783482

9. TorquatoR., Xu W., Freitas W., Lepka J., Pascal R. Propagation characteristics of high-frequency harmonics in distribution systems. IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). 2016. doi: 10.1109/PESGM.2016.7741220

10. Jia Pengfei, Zhang Shuqi, Yu Xinru, Wu Chao, Guan Jianxin. The On-site Measurement Research of Converter Transformer Harmonic Losses Based on Harmonic Power Source. IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2018. doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642022

11. Zatsepina V. I., Zatsepin E. P., Skomorokhov P. I. Povyshenie effektivnosti funktsionirovaniya sistem elektrosnabzheniya posredstvom kombinirovannogo vozdeistviya na iskazheniya napryazheniya [Increasing the efficiency of the functioning of power supply systems by means of a combined effect on voltage distortions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki = Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy Problems*, 2019, vol. 21, no. 5, pp. 81–88. doi: 10.30724/1998-9903-2019-21-5-79-86 (In Russ.)

12. Yaghoobi J., Zare F., Rehman T., Rathnayake H. Analysis of High Frequency Harmonics in Distribution Networks: 9–150 kHz. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2019. doi: 10.1109/ICIT.2019.8755071

13. Song W., Fang J., Jiang Z. Numerical AC loss analysis in HTS stack carrying non-sinusoidal transport current. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2019, vol. 29, no. 2. doi: 10.1109/TASC.2018.2882066

14. Wenjuan Song, Jin Fang, Zhenan Jiang, Mike Staines, Rodney Badcock. AC Loss Effect of High-Order Harmonic Currents in a Single-Phase 6.5 MVA HTS Traction Transformer. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, vol. 29, no. 5. doi: 10.1109/TASC.2019.2901014

15. Kovalenko D. V., Kiselev B. Yu., Plotnikov D. I. Metodika rascheta passivnykh fil'trov, prednaznachennykh dlya kompensatsii vysshikh garmonik toka v sistemakh elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii [Methodology for calculating passive filters designed to compensate for higher harmonics of current in power supply systems of industrial enterprises]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Scientific Research Journal*, 2017, no. 1 (55), pp. 82–86. (In Russ.) doi: 10.23670 / IRJ.2017.55.093

16. Dvorkin D. V., Silaev M. A., Tulsky V. N. Problemy otsenki vklada potrebitelya v iskazhenie kachestva elektroenergii [Problems of assessing the consumer's contribution to the distortion of the quality of electricity]. *Elektrichestvo = Electricity*, 2017, no. 7, pp. 12–19. (In Russ.) doi: 10.24160 / 0013-5380-2017-7-12-19

17. Faifer L. A., Osipov D. S., Eremin E. N. Primenenie paketnogo veivlet-preobrazovaniya dlya opredeleniya sostavlyayushchikh moshchnosti pri nesinusoidal'nykh rezhimakh [Application of packet wavelet transform to determine the power components in non-sinusoidal modes]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2016, vol. 8 (115), pp. 136–145. doi: 10.21285 / 1814-3520-2016-8-136-145. (In Russ.)

18. Biryulin V. I., Kudelina D. V., Larin O. M. Electricity quality problems in the 0.4 kv city electric networks. International Conference on Industrial Engineering, Application and Manufacturing, ICIEAM-2020. Collection of materials. Chelyabinsk, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112048

19. Biryulin V. I., Gorlov A. N., Kudelina D. V. Calculation of cable lines insulation heating with the account of high harmonics currents Proceedings – 2018. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM-2018. doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728688

20. Biryulin V. I., Gorlov A. N., Kudelina D. V. Modeling cable lines heating by currents of higher harmonics and interharmonics. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM-2019. doi: 10.1109/ICIEAM.2019. 8743089

Информация об авторах / Information about the Authors

Бирюлин Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: bir1956@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-1681-184X
Researcher ID: ABA-6330-2020

Vladimir I. Biryulin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Power Supply, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: bir1956@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-1681-184X
Researcher ID: ABA-6330-2020

Грачева Елена Ивановна, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Российская Федерация,
e-mail: grachieva.i@bk.ru,
ORCID: 0000-0002-5379-847X,
Researcher ID: ABE-4861-2020

Elena I. Gracheva, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation,
e-mail: grachieva.i@bk.ru,
ORCID: 0000-0002-5379-847X,
Researcher ID: ABE-4861-2020

Куделина Дарья Васильевна, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: mary_joy@mail.ru,
ORCID: 0000-0003-2304-9547,
Researcher ID: O-6973-2017

Daria V. Kudelina, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Power Supply, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: mary_joy@mail.ru,
ORCID: 0000-0003-2304-9547,
Researcher ID: O-6973-2017

Танцюра Антон Олегович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: tanczyra@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-4517-7139,
Researcher ID: ABF-4335-2020

Anton O. Tantsyura, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Power Supply, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: tanczyra@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-4517-7139,
Researcher ID: ABF-4335-2020

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311

Моделирование работы асинхронных электродвигателей при изменениях напряжения электрической сети

В. И. Бирюлин[1], Е. И. Грачева[2], Д. В. Куделина[1] ✉, О. М. Ларин[1]

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

[2] Казанский государственный энергетический университе
ул. Красносельская 51, г. Казань 420066, Российская Федерация

✉ e-mail: mary_joy@mail.ru

Резюме

Цель исследования. *В настоящее время в различных отраслях промышленности эксплуатируется большое количество трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором. В процессе работы электрических сетей систем электроснабжения происходят постоянные изменения напряжения. Если они имеют достаточно большую величину, то возникают различные неблагоприятные воздействия на работающее электрооборудование, в том числе и на электродвигатели. Для компенсации этих негативных проявлений снижения качества электроэнергии могут применяться различные технические мероприятия, но для их внедрения необходимы финансовые затраты. Следовательно, для эффективного применения таких мероприятий необходимо произвести оценку последствий снижения напряжения в электрической сети на работу асинхронных электродвигателей.*

Цель исследования – определение математических зависимостей, позволяющих находить значения потребляемой мощности при разных значениях приложенного к электродвигателю напряжения, учитывая также величину нагрузки на рассматриваемый электродвигатель. Эти зависимости составляются и применяются отдельно для активной и реактивной мощности.

Задачи: получить экспериментальные данные потребления активной и реактивной мощности асинхронным электродвигателем при снижении напряжения в питающей электрической сети и различных величинах нагрузки на этот электродвигатель. На основе этих данных осуществляется аппроксимация в два этапа для получения статических характеристик или зависимостей потребления мощности от напряжения, учитывающих нагрузку на электродвигатель в отличие от широко известных подобных характеристик.

Методы*. В работе использовались методы теоретической электротехники. Математические зависимости получены с применением компьютерной системы научно-технических расчетов MatLab.*

Результаты*. Изложенный в статье подход к определению статических характеристик электродвигателей позволяет получать характеристики, обеспечивающие получение более точных значений потребления активной и реактивной мощности асинхронными электродвигателями при различных напряжениях в электрической сети.*

Заключение. *Применение результатов работы способствует определению влияния изменений напряжения на производительность технологических установок для нахождения оценки негативного влияния этих изменений.*

© Бирюлин В. И., Грачева Е. И., Куделина Д. В., Ларин О. М., 2020

Ключевые слова: *асинхронные электродвигатели; напряжение; коэффициент загрузки; статическая характеристика; качество электроэнергии; аппроксимация, полином.*

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

Для цитирования: Моделирование работы асинхронных электродвигателей при изменениях напряжения электрической сети / В. И. Бирюлин, Е. И. Грачева, Д. В. Куделина, О. М. Ларин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 152–170.

Поступила в редакцию 20.07.2020 *Подписана в печать 17.08.2020* *Опубликована 30.11.2020*

Asynchronous Electric Motors Operation Modeling with the Electrical Network Voltage Changes

Vladimir I. Biryulin[1], Elena I. Gracheva[2], Daria V. Kudelina[1], Oleg M. Larin[1] ✉

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

[2] Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya str., Kazan 420066, Russian Federation

✉ e-mail: mary_joy@mail.ru

Abstract

Purpose of research. *Currently, a large number of three-phase asynchronous electric motors with a squirrel-cage rotor are used in various industries. During operation the constant voltage changes occur. If they are large enough, then there are various adverse effects on working electrical equipment, including electric motors. To compensate for these negative manifestations of a decrease in the quality of electricity, various technical measures can be used, but financial costs are necessary for their implementation. Consequently, for the effective application of such measures, it is necessary to assess the consequences of reducing the voltage in the electrical network on the operation of asynchronous electric motors.*

Purpose of research to determine the mathematical dependencies that make it possible to find the values of power consumption at different values of the voltage applied to the electric motor, taking into account the magnitude of the load on the electric motor. These dependencies are compiled and applied separately for active and reactive power.

Objectives: to obtain experimental data on the consumption of active and reactive power by an asynchronous electric motor with a decrease in voltage in the supply electrical network and various values of the load on this electric motor. Based on these data, a two-step approximation is carried out to obtain static characteristics or dependences of power consumption on voltage, taking into account the load on the electric motor, in contrast to the well-known similar characteristics.

Methods. *The work used the methods of theoretical electrical engineering. Mathematical dependencies were obtained using the computer system of scientific and technical calculations MatLab.*

Results. *The approach to determining the static characteristics of electric motors described in the article allows obtaining characteristics which provide more accurate values of the consumption of active and reactive power by asynchronous electric motors at various voltages in the electrical network.*

Conclusion. *The application of the work's results helps to determine the influence of voltage changes on the performance of technological units to find annegative impact estimate of these changes.*

Keywords: *asynchronous electric motors; voltage; load factor; static characteristic; power quality; approximation; polynomial.*

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

For citation: Biryulin V. I., Gracheva E. I., Kudelina D. V., Larin O. M. Asynchronous Electric Motors Operation Modeling with the Electrical Network Voltage Changes. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(3/4): 151–169. (In Russ.)

Received 20.07.2020 *Accepted 17.08.2020* *Published 30.11.2020*

Введение

Для современного мира характерно всеобъемлющее применение электрической энергии во всех отраслях экономики, на транспорте, жилищном хозяйстве и других сферах. При этом электроэнергия представляет собой один из видов продукции товарного производства, обладая при этом свойствами товара, в том числе и качеством.

Качество любого товара определяется совокупностью определенных характеристик или показателей. Это утверждение справедливо и для электроэнергии. Ее качество также устанавливается определенным набором количественных нормативов, фиксирующих номинальные величины показателей качества и допустимые отклонения от нормативных значений [1].

Под воздействием различных причин, как внутреннего, так и внешнего характера, в системах электроснабжения промышленных предприятий могут возникать нарушения качества электроэнергии [2; 3; 4]. Например, изменение значения напряжения в течение суток создается неравномерным характером работы потребителей электроэнергии. Данные нарушения отрицательно действуют на состояние и работу различного оборудования, включая электроприемники, объекты электрических сетей и систем электроснабжения [5; 6; 7]. Это отрицательное воздействие проявляется как снижение функциональных возможностей данных электроприемников, например, при пониженном напряжении сети происходит ослабление светового потока электрических источников света, параметры режимов работы электрических двигателей начинают заметно отклоняться от нормальных значений. Также вероятно возникновение дополнительных потерь электроэнергии в электрических сетях и электрооборудовании и других негативных моментов.

Поэтому изучение режимов работы различного электрического оборудования при снижении качества электроэнергии, в том числе уменьшения значения напряжения на вводах асинхронных двигателей (АД), является актуаль-

ным и его результаты важны с точки зрения практического применения.

Материалы и методы

Широкое применение АД с короткозамкнутым ротором, как на промышленных предприятиях, так и в других сферах экономики, обеспечивается их несложным устройством, особенно отсутствием электрических контактов подвижных деталей, таких как щеточно-коллекторный узел, как у электрических двигателей постоянного тока или щеточно-кольцевые контакты, так и у асинхронных электродвигателей с фазным ротором.

Поэтому особенности режимов работы АД при питании пониженным напряжением должны учитываться при анализе процессов производства продукции на промышленных предприятияхи потребления электрической энергии технологическим и вспомогательным оборудованием. У значительной части данного оборудования электроприводы выполнены с применением АД.

Другие же типы электрических двигателей применяются в электрических электроприводах лишь при наличии особенных требований, например, необходимость регулирования частоты вращения этих электродвигателей в широких пределах, хотя в настоящее время все большее и большее распространение приобретают устройства частотно-регулируемого привода, обеспечивающие регулирование частоты вращения роторов АД с короткозамкнутым ротором в широких пределах, что еще больше расширяет область применения этих электродвигателей.

При снижении значения напряжения в электрической сети предприятия, и соответственно на выводах АД, происходит изменение параметров режима работы АД, включая частоту вращения ротора, потребляемую из электрической сети мощность, как активную, так и реактивную. Эти изменения режима работы АД неизбежно скажутся на работе производственного оборудования, которое приводится в действие данными электродвигателями.

Конечно, в зависимости от величины снижения напряжения в электрической сети цеха или предприятия, воздействия на производственное оборудование тоже могут оказаться разными по своему проявлению. При возникновении относительно небольших отклонениях напряжения, особенно кратковременных, работа АД и приводимых ими производственных установок может практически не меняться, особенно если учитывать механическую инерцию, как ротора электродвигателя, так и вращающихся частей приводимого в действие технологического или вспомогательного оборудования.

При более значительных отклонениях последствиями снижения качества электроэнергии в электрических сетях предприятия уже нельзя пренебрегать, что требует обстоятельного рассмотрения данной ситуации. Но для объективного анализа влияния качества электро-

энергии в цеховой или заводской электрических сетях на работу технологического и вспомогательного оборудования предприятия необходимо пользоваться рассчитанными значениями снижения производительности этого оборудования на основе значений параметров режимов работы приводных АД. Для определения данных параметров могут использоваться различные способы, основанные либо на теоретических данных, полученных по математическим моделям электродвигателей, либо на основании данных, полученных в результате проведения опытов по изучению работы АД при уменьшении напряжения в электрической сети, к которой подключается АД.

Авторами статьи выполнено исследование режимов работы трехфазного АД при снижении питающего напряжения, чтобы на основании полученных результатов разработать математические выражения, по которым можно рассчитывать значения параметров режимов работы АД, сопровождающихся понижением напряжения. Исследуемый АД имеет следующие характеристики:

– номинальная активная мощность 2,2 кВт;

– номинальная частота вращения ротора 1420 об/мин.

Чтобы обеспечить различные значения напряжения на выводах обмотки статора в процессе проведения эксперимента, исследуемый АД получал питание от вторичной обмотки трехфазного автотрансформатора. Первичная обмотка этого автотрансформатора была подключена к трехфазной сети напряжением 380 В. Контроль и регистрация параметров режима работы АД осуществлялись прибором AR5.

Так как на выходе примененного автотрансформатора наибольшее значение напряжения составляет 127 В, то перед началом проведения исследования схема соединения статорных обмоток АД была изменена со звезды на треугольник. При выполнении исследования напряжение периодически понижалось до величины 110 В. Загрузка АД во время эксперимента также изменялась от минимального значения, при котором коэффициент загрузки k_3 был равен 0,17, до наибольшей величины с коэффициентом загрузки k_3, равным 1,02.

Регулирование напряжения в сторону его снижения производилось для каждого из значений устанавливаемой для АД нагрузки. Эксперимент проводился непрерывно, без остановок и повторных запусков исследуемого АД.

Результаты и их обсуждение

Взаимосвязь питающего напряжения и потребления мощности из электрической сети для АД не выражается простыми соотношениями [7; 8; 9]. Такой вывод базируется как на проведенном анализе различных источников [8; 9; 10], так и результатах выполненных измерений параметров режима работы

АД при изменяющемся напряжении [11; 12; 13].

Эти опытные данные, полученные в ходе обработки специализированным программным обеспечением прибора AR5 предварительных результатов, представлены в виде графиков, показывающих одновременно характер изменений величины напряжения на зажимах АД и активной и реактивной мощности, потребляемой исследуемым АД [14; 15; 16]. Данные графики приведены ниже (рис. 1–3).

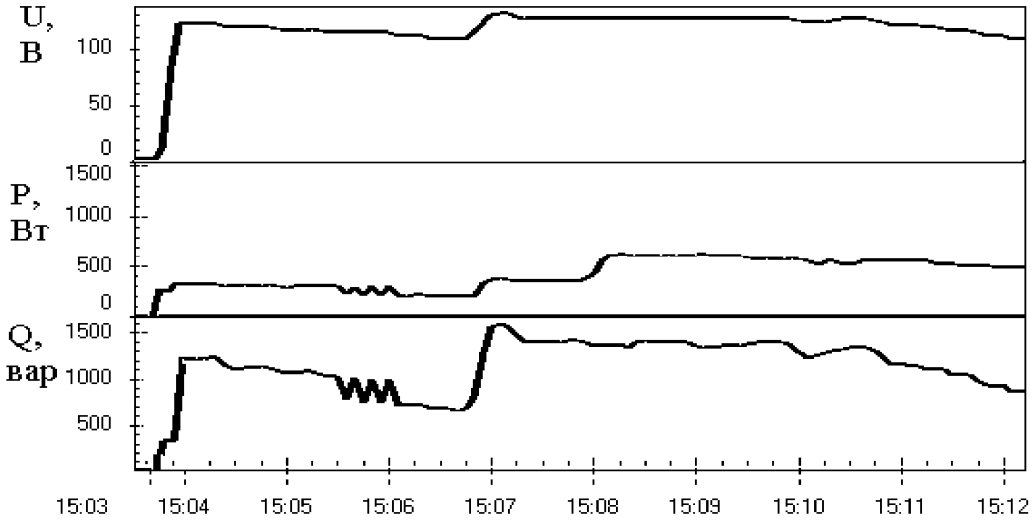

Рис. 1. Графики изменений напряжения, активной и реактивной мощности АД при значениях нагрузки от k_3= 0,17 до k_3 = 0,37

Fig. 1. Graphs of voltage changes, active and reactive asynchronous electric motors power at load values from k_3 = 0,17 to k_3 = 0,37

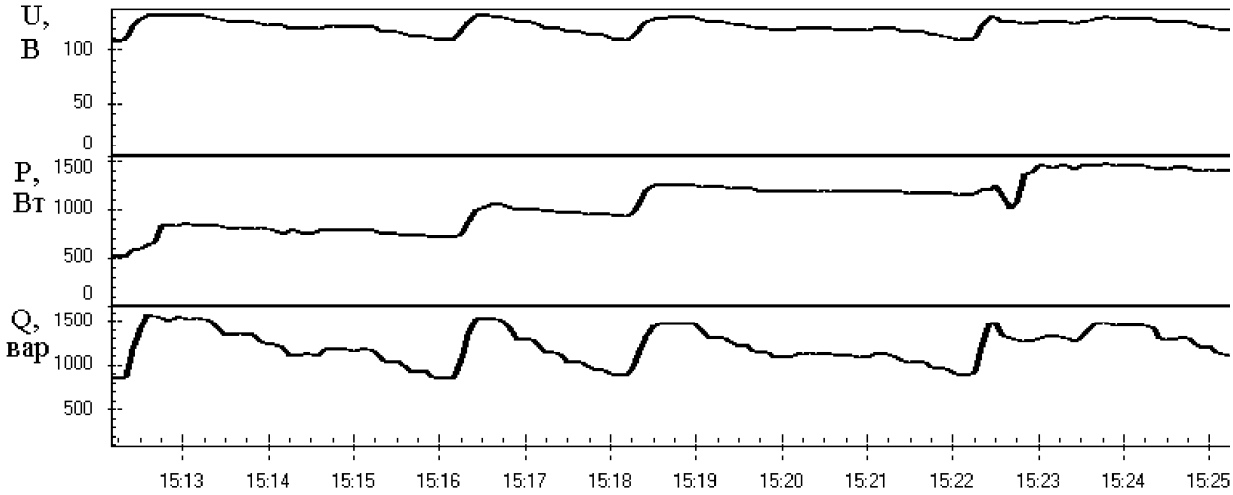

Рис. 2. Графики изменений напряжения, активной и реактивной мощности АД при значениях нагрузки от k_3 = 0,37 до k_3 = 0,56

Fig. 2. Graphs of voltage changes, active and reactive asynchronous electric motors power at load values from k_3 = 0,37 to k_3 = 0,56

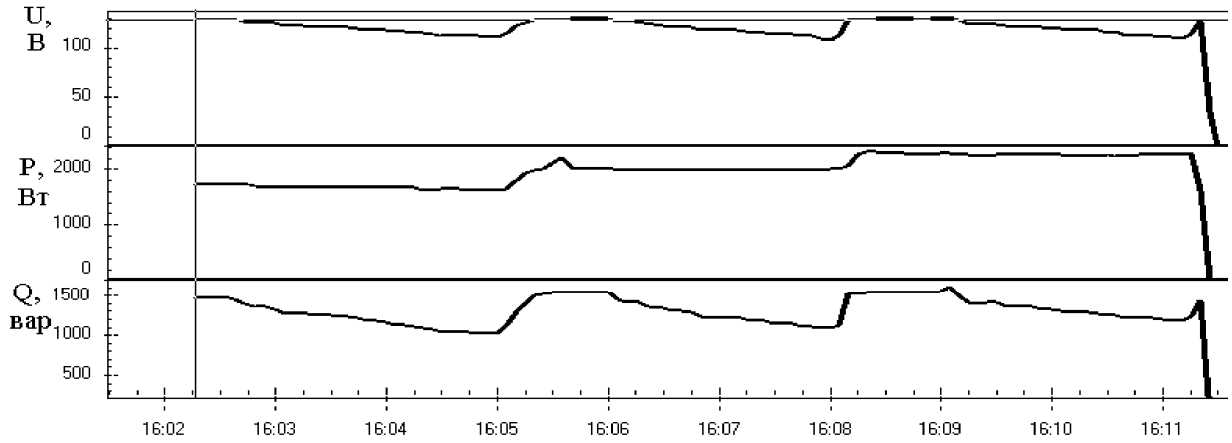

Рис. 3. Графики изменений напряжения, активной и реактивной мощности АД при значениях нагрузки от $k_З$ = 0,56 до $k_З$ = 1,02

Fig. 3. Graphs of voltage changes, active and reactiveasynchronous electric motors power at load values from $k_З$ = 0,56 to $k_З$ = 1,02

Полученные опытные данные показывают, что снижение значения напряжения на зажимах АД сопровождалось однозначно сокращением потребления реактивной мощности этого двигателя. По активной же мощности такой простой вывод сделать нельзя из-за более сложной зависимости между этими параметрами режима работы АД.

Обсуждение этой зависимости начнем с наименьших величин нагрузки на исследуемой АД. Согласно полученным опытным данным (график приведен на рис. 1), снижение напряжения, питающего АД, сопровождается также некоторым сокращением потребления активной мощности из электрической сети. В этом диапазоне значений нагрузки взаимная связь между питающим АД напряжением и потребляемой активной мощностью выглядит достаточно простой и близкой к линейной.

С ростом загрузки АД график изменения потребления активной мощности (см. рис. 2 и рис. 3) начинает все больше и больше расходиться с первым экземпляром. Данный график постепенно приближается становится прямолинейным. В конце опытного исследования, когда к АД прикладывалась наибольшая нагрузка, заметных изменений величины активной мощности, потребляемой от источника питания, практически не наблюдалось. В этих диапазонах нагрузки, в отличие от первого, существует другой характер рассматриваемого процесса.

Для анализа режимов работы электроприемников, в том числе и АД, широко используются статические характеристики (СХ). Применение этих характеристик основано на взаимных зависимостях различного вида между потреблением АД мощности электрической сети от величины напряжения на зажимах статорной обмотки этого двигателя [17]. В этих и других источниках СХ для АД представляются простыми

полиномами (первого порядка), определяющими только взаимосвязь между потребляемой мощностью и напряжением сети.

Но приведенные выше данные показывают, что использование для расчетов режимов работы АД СХ в виде простых полиномов, имеющих первый порядок, дает результаты той или иной степени приближения к реальному режиму работы АД. Более или менее точные данные при использовании полиномов первой степени могут быть получены для относительно узкого диапазона приложенной к АД нагрузке.

Следовательно, для получения более точных результатов необходимо использовать эти характеристики, выражающиеся более сложными полиномами, чем первогопорядка, что может быть выражено только с помощью нелинейных функций (второй порядок и выше).

По полученным экспериментальным данным авторами статьи решалась задача получения СХ АД, учитывающих не только величину напряжения в питающей сети, но и значения нагрузки на АД. Эта задача выполнялась в два следующих этапа.

Первый этап нахождения СХ включал в себя подготовку исходных двух пар векторов-строк. Базисом для этих векторов-строк являлись значения изменяющейся нагрузки на двигатель, выражаемые через величины коэффициента загрузки или k_3, соответствующего определенной нагрузке, составлялись две пары численных векторов (строк).

В каждой паре базисному вектору-строке значений нагрузки соответствовал также вектор-строка с данными по изменению напряжения, приложенного к исследуемому АД. Напряжение задавалось в относительных единицах. А второй вектор-строка каждой рассматриваемой пары содержал опытные данные по потреблению из электрической сети исследуемым электродвигателем активной и реактивной мощности. Эти показатели, как и значения нагрузки на АД, также были введены с применением относительных единиц.

Далее предварительно подготовленные на первом этапе пары векторов были использованы для получения коэффициентов, представляющих уравнения СХ для АД, выражаемых полиномами первой степени вида:

$$P = a_1 U + b_1 ; \quad (1)$$

$$Q = a_2 U + b_2 . \quad (2)$$

Эти полиномы определялись для каждого из значений нагрузки, примененных в ходе выполнения эксперимента по изучению работы АД при регулировании подведенного к этому двигателю напряжения.

Поиск данных коэффициентов выполнялся на персональном компьютере в системе научно-технических расчетов MATLAB [18; 19; 20]. Результаты нахождения этих полиномов при фиксированных значениях k_3, приведены ниже (табл. 1).

Таблица 1. Виды статических характеристик асинхронных двигателей при различных коэффициентах загрузки

Table 1. Types of static characteristics of asynchronous motors at different load factors

Коэффициент загрузки Load factor	Статические характеристики асинхронного двигателя Static characteristics of an induction motor
1,02	$P = 0{,}051 \cdot U + 1{,}1156$ $Q = 1{,}1535 \cdot U - 0{,}3169$
0,92	$P = 0{,}099 \cdot U + 0{,}9445$ $Q = 1{,}3708 \cdot U - 0{,}5334$
0,85	$P = 0{,}1316 \cdot U + 0{,}8239$ $Q = 1{,}5326 \cdot U - 0{,}6845$
0,78	$P = 0{,}1653 \cdot U + 0{,}7039$ $Q = 1{,}6762 \cdot U - 0{,}8356$
0,66	$P = 0{,}2258 \cdot U + 0{,}4975$ $Q = 1{,}9682 \cdot U - 1{,}0938$
0,56	$P = 0{,}2975 \cdot U + 0{,}323$ $Q = 2{,}2649 \cdot U - 1{,}284$
0,46	$P = 0{,}3518 \cdot U + 0{,}1535$ $Q = 2{,}4515 \cdot U - 1{,}4812$
0,4	$P = 0{,}3581 \cdot U + 0{,}0499$ $Q = 2{,}5574 \cdot U - 1{,}7094$
0,28	$P = 0{,}4171 \cdot U - 0{,}1594$ $Q = 2{,}7534 \cdot U - 1{,}9236$
0,17	$P = 0{,}5482 \cdot U - 0{,}3756$ $Q = 3{,}1048 \cdot U - 2{,}2236$

Как хорошо видно из таблицы 1, использование полиномов первой степени, представляющих СХ АД, может давать более или менее точные результаты расчетов параметров режимов работы АД при нарушениях качества электроэнергии в питающих электрических сетях только в узких диапазонах значений приложенной к АД нагрузки со стороны приводимого производственного механизма. Для примера значение коэффициента a_1 СХ для активной мощности в первой строке (коэффициент загрузки равен 1,02) составляет 0,051. Этот же коэффициент в последней строке (коэффициент загрузки равен 0,17) имеет значение 0,5482. Раз-

личие между приведенными значениями примерно в 10,5 раза.

На втором этапе выполнялось нахождение СХ АД более сложного вида, учитывающих как величину напряжения электрической сети, так и загрузку исследуемого АД. Для этого использовались как опытные данные, так и полученные на первом этапе данные и приведенные (см. табл. 1).

Сложные СХ АД, учитывающие изменения напряжения сети и загрузки исследуемого АД, должны иметь вид функций, у которых в отличие от приведенных в (1) и (2) СХ вместо коэффициентов a и b используются некоторые функции, учитывающие величину загрузки. Таким образом, происходит переход от простых функциональных зависимостей первого порядка к функциям двух переменных (напряжения в питающей электрической сети и величины загрузки исследуемого АД). Это позволяет получать более близкие к истинным значения параметров режимов работы АД при снижении качества электроэнергии. Искомые сложные СХ АД должны иметь следующий вид:

$$P = f_1(\kappa_з)U + f_2(\kappa_з)\,; \qquad (3)$$

$$Q = f_3(\kappa_з)U + f_4(\kappa_з)\,, \qquad (4)$$

где f_1, f_2 – функции, представляющие взаимные связи между коэффициентами загрузки исследуемого АД и коэффициентами уравнений СХ, представляющих потребление из электрической сети активной мощности АД при отклонениях напряжения от номинального значения; f_3, f_4 – аналогичные функции для СХ потребления АД реактивной мощности из питающей электрической сети.

Нахождение этих функций производилось с использованием следующих численных векторов: $\kappa_з$, A_1 и A_2, B_1 и B_2, содержащих значения коэффициента загрузки и коэффициентов СХ АД, взятых из таблицы 1. Эти вектора представляют по существу значения потребления мощности АД, определенного исходя из величины напряжения на выводах статорной обмотки АД, и соответствующие коэффициенты загрузки.

Исходные векторы: $\kappa_з$, A_1 и A_2, B_1 и B_2 – использовались в следующих сочетаниях. Для нахождения СХ АД, представляющих потребление из электрической сети активной мощности, применялись пары векторов – $\kappa_з$ и A_1, $\kappa_з$ и B_1. Для таких же характеристик, но уже по реактивной мощности – $\kappa_з$ и A_2, $\kappa_з$ и B_2.

Искомые СХ могут выражаться полиномами разной степени. Поэтому для получения наиболее подходящего результата искомые функции f_1, f_2, f_3, f_4 находились в виде полиномов от первой (хотя выше и указано, что применение полинома первого порядка нецелесообразно) до третьей степеней. Все найденные таким образом полиномы представлены ниже в виде следующей совокупности:

$$f_1 = \begin{cases} -0,5533 \cdot \kappa_3 + 0,6031; \\ 0,1452 \cdot \kappa_3^2 - 0,7269 \cdot \kappa_3 + 0,6441; \\ -0,3592 \cdot \kappa_3^3 + 0,7849 \cdot \kappa_3^2 - 1,0606 \cdot \kappa_3 + 0,6916, \end{cases} \quad (5)$$

$$f_2 = \begin{cases} 1,7388 \cdot \kappa_3 - 0,6529; \\ -0,0831 \cdot \kappa_3^2 + 1,8381 \cdot \kappa_3 - 0,6765; \\ 0,2567 \cdot \kappa_3^3 - 0,5402 \cdot \kappa_3^2 + 2,0767 \cdot \kappa_3 - 0,7106, \end{cases} \quad (6)$$

$$f_3 = \begin{cases} -2,237 \cdot \kappa_3 + 3,4252; \\ 0,1881 \cdot \kappa_3^2 - 2,4618 \cdot \kappa_3 + 3,4784; \\ -0,7656 \cdot \kappa_3^3 + 1,5517 \cdot \kappa_3^2 - 3,1733 \cdot \kappa_3 + 3,5803, \end{cases} \quad (7)$$

$$f_4 = \begin{cases} 2,2078 \cdot \kappa_3 - 2,5579; \\ -0,1956 \cdot \kappa_3^2 + 2,4415 \cdot \kappa_3 - 2,6132; \\ 0,5731 \cdot \kappa_3^3 - 1,2163 \cdot \kappa_3^2 + 2,9741 \cdot \kappa_3 - 2,6895. \end{cases} \quad (8)$$

Для окончательного выбора вида функций исходя из примененных в эксперименте значений нагрузки на АД были рассчитаны все параметры функций f_1, f_2, f_3, f_4. Другими словами, производился переход от вида СХ по выражениям (3) и (4) к выражениям (1) и (2). Некоторые результаты расчетов для примера приведены ниже (табл. 2):

– a_1 – значения коэффициента при активной мощности в полиноме (1), полученного по опытным данным, и приведенные в таблице 1;

– a_{11}, a_{12}, a_{13} – значения, найденные при расчетах значений функции f_1 при разных величинах загрузки АД;

– Δ_1, Δ_2, Δ_3 – погрешности расчетных значений, соответствующие представлению искомых функций полиномами от первого до третьего порядков.

Расчет погрешностей проводился для дальнейшего анализа и окончательного выбора полученных расчетным путем функций $f_1 - f_4$. Для этой цели находилась разность между коэффициентами СХ, полученными по данным проведенного эксперимента и аналогичными характеристиками, выраженными формулами (5) – (8). Для этих расчетов использовались СХ, учитывающие активную мощность. Данные погрешности определялись в процентах и приведены в таблице 2. Для сокращения объема статьи перечисленные данные были приведены только по коэффициентам *a* СХ активной мощности.

По данным таблицы 2 производился анализ общих или суммарных погрешностей применения полиномов различных степеней для построения сложных СХ. Эти погрешности рассчи-

тывались на основании данных из таблицы 2 следующим образом:

$$\Delta_{\sum} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta_i}{n}, \qquad (9)$$

где Δ_i – погрешность i-го значения коэффициентов полиномов разных степеней; n – количество примененных в ходе расчетов значений $к_3$.

Таблица 2. Результаты расчетов коэффициента a_1 статических характеристик асинхронного двигателя по полиномам от первого до третьего порядков

Table 2. The results of calculating the coefficient a1 of the static characteristics of an induction motor by polynomials from the first to third orders

$k_з$	a_1 по опытным данным a_1 according to experimental data	a_1 по расчетным данным a_1 according to calculated data					
		первый полином first polynomial		второй полином second polynomial		третий полином third polynomial	
		a_{11}	Δ_1	a_{12}	Δ_2	a_{13}	Δ_3
1,02	0,0510	0,0387	24,0509	0,0537	5,3491	0,0455	-10,7607
0,92	0,0990	0,0940	4,9858	0,0982	-0,7583	0,1008	1,8006
0,85	0,1316	0,1328	-0,9080	0,1311	-0,3480	0,1368	4,0171
0,78	0,1653	0,1715	-3,7664	0,1655	0,0954	0,1717	3,8754
0,66	0,2258	0,2379	-5,3684	0,2276	0,7950	0,2305	2,0982
0,56	0,2975	0,2932	1,4278	0,2826	-5,0182	0,2810	-5,5370
0,46	0,3518	0,3486	0,9147	0,3405	-3,2261	0,3351	-4,7340
0,40	0,3851	0,3984	-3,4482	0,3950	2,5772	0,3887	0,9442
0,28	0,4171	0,4482	-7,4505	0,4519	8,3557	0,4485	7,5480
0,17	0,5482	0,5090	7,1436	0,5247	-4,2825	0,5325	-2,8608

Исходя из проведенных расчетов для представления функций f_1, f_2, f_3, f_4 предпочтение в дальнейшем использовании было отдано полиномам третьей степени. Используя эти полиномы, определяются сложные характеристики, учитывающие изменение параметров режима работы АД при питании его пониженным, относительно номинального значения, напряжением электрической сети цеха или предприятия.

В результате этого искомые сложные СХ для исследуемого АД, учитывающие коэффициенты загрузки, имеют следующий вид:

$$P = (-0,3592 \cdot \kappa_3^3 + 0,7849 \cdot \kappa_3^2 - 1,0606 \cdot \kappa_3 + 0,6916)U + \\ + 0,2567 \cdot \kappa_3^3 - 0,5402 \cdot \kappa_3^2 + 2,0767 \cdot \kappa_3 - 0,7106; \quad (10)$$

$$Q = (-0,7656 \cdot \kappa_3^3 + 1,5517 \cdot \kappa_3^2 - 3,1733 \cdot \kappa_3 + 3,5803)U + \\ + 0,5731 \cdot \kappa_3^3 - 1,2163 \cdot \kappa_3^2 + 2,9741 \cdot \kappa_3 - 2,6895. \quad (11)$$

Используя такой подход, можно определить сложные СХ, позволяющие учитывать не только значения напряжения, но и загрузку исследуемых электродвигателей. Эти действия можно выполнять для любого АД, но обязательно в совокупности с производственным механизмом. Это позволит обеспечить получение более точных результатов при исследованиях процессов работы АД при нарушениях качества электроэнергии в сети, в том числе снижения значения напряжения, чем традиционные СХ, учитывающие только напряжение питающей сети [12].

Выводы

В статье предложен способ нахождения сложных СХ АД, представляющих собой функции двух переменных – сетевого напряжения и величины нагрузки на электрический двигатель со стороны производственного механизма. Данный способ позволяет определять совокупность СХ для АД в широком диапазоне нагрузок и рассчитывать значения активной и реактивной мощности для разных режимов работы при возникновении в электрической сети отклонений питающего напряжения от нормативного значения напряжения при разных величинах загрузки рассматриваемых двигателей.

Эти расчетные данные следует использовать для определения влияния снижения качества электрической энергии на работу технологического, вспомогательного и другого оборудования промышленных предприятий, выражаемого в конечном итоге через величину недополученной предприятием прибыли. В свою очередь по этой величине можно оценить эффективность различных планируемых мероприятий по повышению качества электроэнергии в электрических сетях отдельных цехов или же всего предприятия в целом.

Список литературы

1. Вагин Г. Я., Куликов А. Л. Качество электрической энергии в системах электроснабжения. Анализ состояния методов нормирования и контроля // Электрические станции. 2019. № 6. С. 54–59. DOI: 10.34831/EP.2019.1055.44184.

2. Наумов А. А. Обеспечение требуемого качества электрической энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 1. С. 85–92. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92.

3. Семёнов А. С., Бондарев В. А., Заголило С. А. Контроль качества электроэнергии и анализ полученных результатов при измерении напряжения // Фундаментальные исследования. 2017. № 9–1. С. 86–92. DOI: 10.17513/fr.41709.

4. Biryulin V. I., Kudelina D. V., Larin O. M. Electricity quality problems in the 0,4 kv city electric networks // International Conference on Industrial Engineering, Application and Manufacturing ICIEAM, 2020: collection of materials. Chelyabinsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112048.

5. Дед А. В., Сикорский С. П., Смирнов П. С. Результаты измерений показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий и организаций // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 60–64. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-60-64.

6. Daniel O. Johnson, Kabiru A. Hassan. Issues of power quality in electrical systems // International Journal of Energy and Power Engineering. 2016. Vol. 5, no. 4. P. 148–154. DOI: 10.11648/j.ijepe.20160504.12.

7. Influence of power quality problem on the performance of an induction motor / Amaize Aigboviosa Peter, Ignatius Kema Okakwu, Emmanuel Seun Olowasogo, Akintunde Samson Alayande, Abel Ehimen Airoboman // American Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2015. Vol. 4, no. 4. P. 39–44. DOI: 10.11648/j.epes.20150404.12

8. Tolibjonovich D. S., Islomovna T. M., Saidulloevna M. D. Modeling of starting transition processes of asynchronous motors with reduced voltage of the supply network // European Journal of Electrical Engineering. 2020. Vol. 22, no. 1. P. 23–28. DOI: 10.18280/ejee.220103.

9. Static Characteristics of Asynchronous Motors with Series Reactive Power Compensation / V. Malyar, O. Hamola, V. Maday, I. Vasylchyshyn // 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). Ceske Budejovice, 2019. P. 141–144. DOI: 10.1109/ACITT.2019.8780064.

10. Мугалимов Р. Г., Мугалимова А. Р. Сравнительная оценка класса энергоэффективности асинхронных двигателей и электротехнических комплексов с их применением // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 4(33). С. 14–19. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-14-19.

11. Махсудов М. Т., Файзуллаев Ш. И. Влияние отклонений показателей качества электроэнергии на режимы работы потребителей и методы их контроля // Современные научные исследования и инновации. 2019. № 11 (103). С. 8.

12. Федянин В. В. Влияние преобразователя частоты на коэффициент полезного действия асинхронного двигателя // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 8 (62), ч. 3. С. 83–87. DOI: 10.23670/IRJ.2017.62.089.

13. Иванов А. В., Бекиров Э. А., Асанов М. М. Анализ влияния параметров напряжения сети на работу асинхронных машин // Строительство и техногенная безопасность. 2016. № 3 (55). С. 67–71.

14. Бекиров Э. А., Воскресенская С. Н., Абибуллаев А. Н. Зависимость скольжения, мощности и вращающего момента асинхронных машин от частоты сети при переходном режиме работы // Строительство и техногенная безопасность. 2018. № 11 (63). С. 161–170.

15. Бекиров Э. А., Асанов М. М., Воскресенская С. Н. Регулирование совместной работы асинхронных двигателей с сетью ограниченной мощности // Вестник Физико-технического института Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. 2017. № 1. С. 86–90.

16. Суворов И. Ф., Романова В. В., Хромов С. В. Исследование влияния несимметрии фазных напряжений на режимы работы асинхронных двигателей в среде имитационного моделирования MATLAB/Simulink // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2016. № 3. С. 72–83.

17. Статические предельные характеристики асинхронного электропривода при частотном векторном управлении / И. Г. Однокопылов, Ю. Н. Дементьев, Ю. В. Крохта [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2018. Т. 18, № 4. С. 109–120. DOI: 10.14529/power180412.

18. Ревинская О. Г. Гибкость использования в MatLab входных и выходных параметров стандартных и нестандартных функций // Программные продукты и системы. 2019. Т. 32, № 1. С. 42–54. DOI: 10.15827/0236-235X.125. 042-054.

19. Семёнов А. С., Якушев И. А., Егоров А. Н. Математическое моделирование технических систем в среде MATLAB // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 8. С. 56–64. DOI: 10.17513/snt.36780.

20. Шпилев Е. М. Применение программного комплекса Matlab для решения математических задач // Вопросы науки и образования. 2018. № 10 (22). С. 166–167.

References

1. Vagin G. Ya., Kulikov A. L. Kachestvo elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya. Analiz sostoyaniya metodov normirovaniya i kontrolya [The quality of electrical energy in power supply systems. Analysis of the state of the methods of regulation and control]. *Elektricheskie stantsii = Electric stations*, 2019, no. 6, pp. 54–59. (In Russ.) doi: 10.34831/EP.2019.1055.44184

2. Naumov A. A. Obespechenie trebuemogo kachestva elektricheskoi energii [Ensuring the required quality of electrical energy]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy*

energetiki = Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy problems, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 85–92. (In Russ.) doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92

3. Semyonov A. S., Bondarev V. A., Zagolilo S. A. Kontrol' kachestva elektroenergii i analiz poluchennykh rezul'tatov pri izmerenii napryazheniya [Power quality control and analysis of the results obtained when measuring voltage]. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research,* 2017, no. 9-1, pp. 86–92. (In Russ.) doi: 10.17513 / fr.41709

4. Biryulin V. I., Kudelina D. V., Larin O. M. Electricity quality problems in the 0.4 kv city electric networks // International Conference on Industrial Engineering, Application and Manufacturing ICIEAM, 2020. Collection of materials. Chelyabinsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112048.

5. Ded A. V., Sikorskiy S. P., Smirnov P. S. Ezul'taty izmerenii pokazatelei kachestva elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya predpriyatii i organizatsii [Results of measurements of power quality indicators in power supply systems of enterprises and organizations]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2018, no. 2 (158), pp. 60–64. (In Russ.) doi: 10.25206 / 1813-8225-2018-158-60-64

6. Daniel O. Johnson, Kabiru A. Hassan. Issues of power quality in electrical systems. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 2016, vol. 5, no. 4, pp. 148–154. DOI: 10.11648/j.ijepe.20160504.12

7. Amaize Aigboviosa Peter, Ignatius Kema Okakwu, Emmanuel Seun Olowasogo, Akintunde Samson Alayande, Abel Ehimen Airoboman. Influence of Power quality problem on the performance of an induction motor. *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2015, vol. 4, no. 4, pp. 39–44. doi: 10.11648/j.epes.20150404.12

8. Tolibjonovich D. S., Islomovna T. M., Saidulloevna M. D. Modeling of starting transition processes of asynchronous motors with reduced voltage of the supply network. *European Journal of Electrical Engineering*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 23–28. doi: 10.18280/ejee.220103

9. Malyar V., Hamola O., Maday V., Vasylchyshyn I. Static Characteristics of Asynchronous Motors with Series Reactive Power Compensation. 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 2019. Ceske Budejovice, 2019, pp. 141–144. doi: 10.1109/ACITT.2019.8780064

10. Mugalimov R. G., Mugalimova A. R. Sravnitel'naya otsenka klassa energoeffektivnosti asinkhronnykh dvigatelei i elektrotekhnicheskikh kompleksov s ikh primeneniem [Comparative assessment of the energy efficiency class of asynchronous motors and electrical complexes with their application]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy = Electrotechnical Systems and Complexes*, 2016, no. 4 (33), pp. 14–19. (In Russ.) doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-14-19

11. Makhsudov M. T., Faizullaev Sh. I. Vliyanie otklonenii pokazatelei kachestva elektroenergii na rezhimy raboty potrebitelei i metody ikh kontrolya [Influence of deviations of power quality indicators on consumer operating modes and methods of their control]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii = Modern Scientific Research and Innovations*, 2019, no. 11 (3), p. 8. (In Russ.)

12. Fedyanin V. V. Vliyanie preobrazovatelya chastoty na koeffitsient poleznogo deistviya asinkhronnogo dvigatelya [The influence of the frequency converter on the efficiency of an asynchronous motor]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Scientific Research Journal*, 2017, no. 8 (62), pt. 3, pp. 83–87. (In Russ.) doi: 10.23670/IRJ.2017. 62.089

13. Ivanov A. V., Bekirov E. A., Asanov M. M. Analiz vliyaniya parametrov napryazheniya seti na rabotu asinkhronnykh mashin [Analysis of the influence of network voltage parameters on the operation of asynchronous machines]. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and Technogenic Safety*, 2016, no. 3 (55), pp. 67–71. (In Russ.)

14. Bekirov E. A., Voskresenskaya S. N., Abibullaev A. N. Zavisimost' skol'zheniya, moshchnosti i vrashchayushchego momenta asinkhronnykh mashin ot chastoty seti pri perekhodnom rezhime raboty [Dependence of slip, power and torque of asynchronous machines on the mains frequency during transient operation]. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'=Construction and Technogenic Safety*, 2018, no. 11 (63), pp. 161–170. (In Russ.)

15. Bekirov E. A., Asanov M. M., Voskresenskaya S. N. Regulirovanie sovmestnoi raboty asinkhronnykh dvigatelei s set'yu ogranichennoi moshchnosti [Regulation of joint operation of asynchronous motors with a limited power network]. *Vestnik Fiziko-tekhnicheskogo instituta Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo = Bulletin of the Physico-Technical Institute of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University*, 2017, no. 1, pp. 86–90. (In Russ.)

16. Suvorov I. F., Romanova V. V., Khromov S. V. Issledovanie vliyaniya nesimmetrii faznykh napryazhenii na rezhimy raboty asinkhronnykh dvigatelei v srede imitatsionnogo modelirovaniya MATLAB/Simulink [Investigation of the influence of phase voltage asymmetry on the operating modes of asynchronous motors in the MATLAB / Simulink simulation environment]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika = Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy*, 2016, no. 3, pp. 72–83. (In Russ.)

17. Odnokopylov I. G., Dementiev Yu. N., Krokhta Yu. V., eds. Ctaticheskie predel'nye kharakteristiki asinkhronnogo elektroprivoda pri chastotnom vektornom upravlenii [Static Limiting Characteristics of Induction Motor Drive with Frequency *Vector Control]. Vestnik*

Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika = Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering. 2018, vol. 18, no. 4, pp. 109–120. (In Russ.) doi: 10.14529/power180412

18. Revinskaya O. G. Gibkost' ispol'zovaniya v MatLab vkhodnykh i vykhodnykh parametrov standartnykh i nestandartnykh funktsii [Flexibility of using input and output parameters of standard and non-standard functions in MatLab]. *Programmnye produkty i sistemy = Software & Systems*, 2019, vol. 32, no. 1, pp. 42–54. (In Russ.) doi: 10.15827/0236-235X.125. 042-054

19. Semyonov A. S., Yakushev I. A., Egorov A. N. Matematicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh sistem v srede MATLAB [Mathematical modeling of technical systems in the MATLAB environment]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern Science-Intensive Technologies*, 2017, no. 8, pp. 56–64. (In Russ.) doi: 10.17513/snt.36780

20. Shpilev E. M. Primenenie programmnogo kompleksa Matlab dlya resheniya matematicheskikh zadach [Application of the Matlab software package for solving mathematical problems]. *Voprosy nauki i obrazovaniya = Problems of Science and Education*, 2018, no. 10 (22), pp. 166–167. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Бирюлин Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: bir1956@mail.ru
ORCID: 0000-0002-1681-184X
Researcher ID: ABA-6330-2020

Vladimir I. Biryulin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Power Supply, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: bir1956@mail.ru
ORCID: 0000-0002-1681-184X
Researcher ID: ABA-6330-2020

Грачева Елена Ивановна, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Российская Федерация,
e-mail: grachieva.i@bk.ru
ORCID: 0000-0002-5379-847X
Researcher ID: ABE-4861-2020

Elena I. Gracheva, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation,
e-mail: grachieva.i@bk.ru
ORCID: 0000-0002-5379-847X
Researcher ID: ABE-4861-2020

Куделина Дарья Васильевна, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: mary_joy@mail.ru
ORCID: 0000-0003-2304-9547
Researcher ID: O-6973-2017

Daria V. Kudelina, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Power Supply, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: mary_joy@mail.ru
ORCID: 0000-0003-2304-9547
Researcher ID: O-6973-2017

Ларин Олег Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: larin77@mail.ru
ORCID: 0000-0002-6436-997X
Researcher ID: F-1316-2019

Oleg M. Larin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Power Supply, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: larin77@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-6436-997X
Researcher ID: F-1316-2019

К сведению авторов

1. К публикации в журнале «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2 Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

- статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;
- разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа.
- сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);
- лицензионный договор.

3. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами.

4. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

5. **Публикация бесплатная.**

6. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны-2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

7. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (строчные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, список литературы. Авторы, название, аннотация и ключевые слова, список литературы приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается аннотация (200-250 слов), отражающая краткое содержание статьи.

8. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.

9. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный – 12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс – 5 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора – 75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы (Ω, η, β, μ, ω, υ и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций (sin, cos, tg и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – прямым шрифтом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF, JPEG, PNG) с разрешением не ниже 300 *dpi* и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. **Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы**.

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания **не допускаются.**

12. **Список литературы к статье обязателен** и должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы (не менее 10). Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 22-25-26, тел/факс (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Изменения и дополнения к правилам оформления статей и информацию об опубликованных номерах можно посмотреть на официальном сайте журнала: **https://swsu.ru/izvestiya/seriesivt/.**