

DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801 ISSN 0236-2910 (Print), 2313-0636 (Online)

Том 28, № 1. 2018

Vol. 28, no. 1. 2018

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

SCHOLARLY JOURNAL

Основан в январе 1990 г.

Founded in January 1990

Выходит один раз в квартал

Issued quarterly

16+

**ВЕСТНИК
МОРДОВСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
MORDOVIA UNIVERSITY BULLETIN**

DOI: 10.15507/0236-2910

Учредитель и издатель –
федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего
образования «Национальный
исследовательский Мордовский
государственный университет
им. Н. П. Огарёва»

FOUNDER AND PUBLISHER –
Federal State
Budgetary Educational
Institution
of Higher Education
“National Research
Ogarev Mordovia
State University”

E-mail: vestnik_mrsu@mail.ru; <http://vestnik.mrsu.ru>

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК)

Индексируется в Web of Science Core Collection (ESCI),
Российском индексе научного цитирования (РИНЦ),
а также EBSCO, Index Copernicus и ResearchBib

Является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ),
Комитета по этике научных публикаций,

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор),
свидетельство ПИ № ФС77-65881 от 27.05.2016 г.

Подписной индекс в каталогах агентств «Роспечать» и «МК-Периодика» – **70539**

Адрес учредителя, издателя и редакции:
430005, Россия, Республика Мордовия,
г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68
Телефон, факс: +7 (8342) 48-14-24

Founder, Publisher and Editorial House address:
68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005,
Republic of Mordovia, Russia
Phone, fax: +7 (8342) 48-14-24

© ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», 2018

Научный журнал «Вестник Мордовского университета»

принимает не опубликованные ранее научные статьи и дискуссионные материалы научного характера кандидатов и докторов наук, преподавателей, аспирантов и студентов старших курсов (в соавторстве).

Наименование и содержание рубрик журнала соответствуют отраслям науки и группам специальностей научных работников, согласно Номенклатуре специальностей научных работников:

01.04.00 Физика

05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление

05.20.00 Процессы и машины агроинженерных систем

Журнал осуществляет научное рецензирование (двустороннее слепое) всех поступающих в редакцию материалов с целью экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в издательстве и редакции в течение 5 лет.

Редакция журнала направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ.

Редакция журнала направляет копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении соответствующего запроса.

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная





“Mordovia University Bulletin” journal

accepts scholarly articles and debatable academic materials not published before from holders of the following degrees: Ph.D., D.Sc., lecturer, postgraduate student and senior student (co-authored).

The titles and contents of the journal sections correspond to fields of science and specialty groups of scientists, according to the Nomenclature of scientific specialties:

01.04.00 Physics

05.13.00 Computer Science, Computer Engineering and Management

05.20.00 Processes and Machines of Argoengineering Systems

All reviewers are acknowledged experts in the areas they are responsible for. Reviews are stored in the publishing house and publishing office during 5 years.

Editorial staff sends to the authors of the submitted materials copies of reviews or a substantiated refusal.

Editorial staff of the journal forwards copies of reviews in Ministry of Education and Science of the Russian Federation by request.

All the materials of the “Mordovia University Bulletin” journal are available under Creative Commons “Attribution” 4.0 license



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Вдовин Сергей Михайлович – *главный редактор*, ректор, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат экономических наук, доцент, ORCID ID: 0000-0001-7363-1389, rector@mrsu.ru (Саранск, Россия)

Сенин Петр Васильевич – *заместитель главного редактора*, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор технических наук, профессор, ORCID ID: 0000-0003-3400-7780, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Саранск, Россия)

Маргулис Виктор Александрович – *главный научный редактор*, заведующий кафедрой теоретической физики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор физико-математических наук, профессор, ORCID ID: 0000-0001-6281-9714, margulisva@mrsu.ru (Саранск, Россия)

Гордина Светлана Викторовна – *ответственный секретарь*, кандидат педагогических наук, ORCID ID: 0000-0003-2265-418X, vestnik_mrsu@mail.ru (Саранск, Россия)

Аллахвердиев Сурхай Рагим оглы – академик Российской Академии Естествознания, профессор кафедры лесной индустрии, Бартынский государственный университет, доктор биологических наук, профессор (Бартын, Турция)

Булгаков Алексей Григорьевич – профессор Института строительного дела, Дрезденский технический университет, доктор технических наук, профессор (Дрезден, Германия)

Дианов Евгений Михайлович – академик Российской академии наук, директор ФГБУН «Научный центр волоконной оптики Российской академии наук», доктор физико-математических наук, профессор, ORCID ID: 0000-0002-5017-2287 (Москва, Россия)

Димитров Валерий Петрович – декан факультета приборостроения и технического регулирования, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», доктор технических наук, профессор, ORCID ID: 0000-0003-1439-1674 (Ростов-на-Дону, Россия)

Ерофеев Владимир Трофимович – член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук, декан архитектурно-строительного факультета, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор технических наук, профессор (Саранск, Россия)

Железникова Ольга Евгеньевна – директор Института электроники и светотехники, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат технических наук, доцент (Саранск, Россия)

Игуменов Леонид Александрович – директор Научно-исследовательского института механики, заведующий кафедрой теоретической, компьютерной и экспериментальной механики, ФГАОУ ВО «Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», доктор физико-математических наук, профессор (Нижний Новгород, Россия)

Калашников Владимир Иванович – заведующий кафедрой технологии строительных материалов и деревообработки, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», доктор технических наук, профессор, ORCID ID: 0000-0002-1979-4678 (Пенза, Россия)

Кечемайкин Владимир Николаевич – директор Рузаевского института машиностроения, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат экономических наук (Саранск, Россия)

Котин Александр Владимирович – заведующий кафедрой механизации переработки сельскохозяйственной продукции, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор технических наук, профессор, ORCID ID: 0000-0003-0078-1866 (Саранск, Россия)

Кузмарцев Федор Васильевич – декан физического факультета, Университет Лафборо, кандидат физико-математических наук (Лафборо, Великобритания)

Микаева Светлана Анатольевна – профессор кафедры ПР-4 «Электротехника и электроника», ФГБОУ ВО «Московский технологический университет», доктор технических наук, профессор (Москва, Россия)

Нишев Константин Николаевич – директор Института физики и химии, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID ID: 0000-0001-7905-3700 (Саранск, Россия)

Прытков Юрий Николаевич – директор Аграрного института, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Саранск, Россия)

Рябочкина Полина Анатольевна – главный научный сотрудник лаборатории оптической спектроскопии лазерных материалов, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор физико-математических наук, доцент, ORCID ID: 0000-0001-8503-8486 (Саранск, Россия)

Салем Абдель-Бахед Мохамед – руководитель Исследовательских лабораторий в области искусственного интеллекта и знаний, профессор факультета компьютерных и информационных наук, университет «Ain Shams», доктор наук в области компьютерных технологий, заслуженный профессор (Каир, Египет)

Скрябин Владимир Александрович – профессор кафедры технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», доктор технических наук, ORCID ID: 0000-0001-7156-9198 (Пенза, Россия)

Чучаев Иван Иванович – декан факультета математики и информационных технологий, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», кандидат физико-математических наук, доцент (Саранск, Россия)

Шиселова Тамара Ильинична – профессор кафедры физики, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», доктор технических наук, профессор (Иркутск, Россия)

Ямашкин Анатолий Александрович – заведующий кафедрой землеустройства и ландшафтного планирования, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор географических наук, профессор (Саранск, Россия)



EDITORIAL BOARD

Sergey M. Vdovin – *Editor in Chief*, Rector of National Research Mordovia State University, Ph.D. (Economics), Associate Professor, ORCID ID: 0000-0001-7363-1389, rector@mrsu.ru (Saransk, Russia)

Petr V. Senin – *Deputy Editor in Chief*, Vice Rector for Science and Research, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID ID: 0000-0003-3400-7780, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Saransk, Russia)

Viktor A. Margulis – *Science Editor in Chief*, Head of Theoretical Physics Chair, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, ORCID ID: 0000-0001-6281-9714, margulisva@mrsu.ru (Saransk, Russia)

Svetlana V. Gordina – *Executive Editor*, Ph.D. (Pedagogy), ORCID ID: 0000-0003-2265-418X, vestnik_mrsu@mail.ru (Saransk, Russia)

Surhay Allahverdi – Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Head of Forest Industry Chair, Bartin University, D.Sc. (Biology), Professor (Bartın, Turkey)

Aleksey G. Bulgakov – Professor of Faculty of Architecture, Dresden University of Technology, D.Sc. (Engineering), Professor (Dresden, Germany)

Ivan I. Chuchayev – Dean of Mathematics and Information Technology Faculty, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor (Saransk, Russia)

Yevgeniy M. Dianov – Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of Fiber Optics Research Center, Russian Academy of Sciences, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, ORCID ID: 0000-0002-5017-2287 (Moscow, Russia)

Valeriy V. Dimitrov – Dean of Device Manufacturing and Technical Regulation Faculty, Don State Technical University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID ID: 0000-0003-1439-1674 (Russia, Rostov-on-Don)

Leonid A. Igumnov – Director of Research Institute of Mechanics, Head of Numerical Simulation of Theoretical, Computer and Experimental Mechanics Chair, Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor (Nizhniy Novgorod, Russia)

Vladimir I. Kalashnikov – Head of Construction Material Technology and Woodwork Chair, Penza State University of Architecture and Construction, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID ID: 0000-0002-1979-4678 (Penza, Russia)

Vladimir N. Kechemaykin – Director of Ruzayevka Campus, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Economy) (Saransk, Russia)

Aleksandr V. Kotin – Director of Institute of Mechanics and Energy, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID ID: 0000-0003-0078-1866 (Saransk, Russia)

Fedor V. Ksmartsev – Dean of Institute of Physics, Loughborough University, Ph.D. (Phys.-Math.) (Loughborough, Great Britain)

Svetlana A. Mikayeva – Professor of Electrotechnics and Electronics Chair, Moscow Engineering University, D.Sc. (Engineering), Professor (Moscow, Russia)

Konstantin N. Nishchev – Director of Institute of Physics and Chemistry, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor, ORCID ID: 0000-0001-7905-3700 (Saransk, Russia)

Yuriy N. Prytkov – Director of Institute of Agriculture, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Agriculture), Professor (Saransk, Russia)

Polina A. Ryabochkina – Professor of Chair of General Physics, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Phys.-Math.), Associate Professor, ORCID ID: 0000-0001-8503-8486 (Saransk, Russia)

Abdel-Badeeh M. Salem – Head of Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Research Labs, Professor of Faculty of Computer and Information Sciences, Ain Shams University, D.Sc. (Computer Science), Emeritus Professor (Cairo, Egypt)

Tamara I. Shishelova – Professor of Physics Chair, Irkutsk National Research Technical University, D.Sc. (Engineering), Scopus ID: 6507978465 (Irkutsk, Russia)

Vladimir A. Skryabin – Professor of Machine Engineering Technology Chair, Penza State University, D.Sc. (Engineering), ORCID ID: 0000-0001-7156-9198 (Penza, Russia)

Anatoliy A. Yamashkin – Head of Land Utilization and Landscape Design Chair, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Geography), Professor (Saransk, Russia)

Vladimir T. Yerofeyev – Member-Correspondent of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Dean of Architectural And Civil Engineering Faculty, National Research Mordovia State University, D.Sc. (Engineering), Professor (Saransk, Russia)

Olga Ye. Zheleznikova – Director of Institute of Electronics and Light Engineering, National Research Mordovia State University, Ph.D. (Engineering), Associate Professor (Saransk, Russia)



СОДЕРЖАНИЕ

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Федоренко В. Ф., Мишуров Н. П., Трубицын Н. В., Таркинский В. Е. Применение инерциальной навигации для определения буксования сельскохозяйственных тракторов.....	8
Аксенов А. Г., Емельянов П. А., Сибирёв А. В. Ориентированная посадка луковиц катушечно-вильчатым высаживающим аппаратом.....	24
Шабарин А. А., Водяков В. Н., Котин А. В., Кувшинова О. А., Матюшкина Ю. И. Очистка питьевой воды от фторидов методом обратного осмоса.....	36

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Шелехов И. Ю., Шишелова Т. И., Смирнов Е. И. Применение новых технических решений в конструировании термоэлектрических систем.....	48
Захаржевский О. А. Метод относительных величин для расчета магнитных потоков в электрических машинах.....	62
Калякулин С. Ю., Кузьмин В. В., Митин Э. В., Сульдин С. П., Тюрбеева Т. Б. Проектирование структуры технологических процессов на основе синтеза.....	77

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Ивлиев С. Н., Крылова С. Л., Шиков С. А. Анализ угроз информационной безопасности протоколов и систем управления освещением.....	85
Фирсова С. А., Тепаева Т. Е. Проектирование прототипа системы автоматизации деятельности совета многоквартирного дома в жилищно-коммунальной сфере.....	95
Яндыбаева Н. В. Моделирование и прогнозирование показателей эффективности образовательной деятельности высшего учебного заведения.....	120
<i>Информация для авторов и читателей (на рус. яз.).....</i>	137
<i>Информация для авторов и читателей (на англ. яз.).....</i>	139



CONTENTS

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

Fedorenko V. F., Mishurov N. P., Trubitsyn N. V., Tarkivskiy V. Ye. Application of Inertial Navigation for Determining the Slippage of Agricultural Tractors.....	8
Aksenov A. G., Emelyanov P. A., Sibirev A. V. Oriented Onion Sowing by a Forked-Roller Sowing Unit.....	24
Shabarin A. A., Vodyakov V. N., Kotin A. V., Kuvshinova O. A., Matushkina Y. I. Purification of Drinking Water from Fluorides by Reverse Osmosis.....	36

MECHANICAL ENGINEERING

Shelekhov I. Yu., Shishelova T. I., Smirnov E. I. New Technical Solutions for Designing Thermoelectric Systems.....	48
Zakharzhevskii O. A. Method of Relative Magnitudes for Calculating Magnetic Fluxes in Electrical Machine.....	62
Kalyakulin S. Yu., Kuzmin V. V., Mitin E. V., Suldin S. P., Tyurbееva T. B. Designing the Structure of Technological Processes Based on Synthesis.....	77

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

Ivliyev S. N., Krylova S. L., Shikov S. A. The Analysis of Threats to Information Security of Protocols and Lighting Control Systems.....	85
Firsova S. A., Tepaeva T. E. Software Prototype Design for Managing Housing and Communal Services in Apartment Buildings.....	95
Yandybaeva N. V. Modeling and Forecasting Performance Indicators for Educational Activities of Higher Educational Institution.....	120
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in Russian)</i>	137
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in English)</i>	139

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ / PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

УДК 631.3:004

DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.008-023



Применение инерциальной навигации для определения буксования сельскохозяйственных тракторов

**В. Ф. Федоренко¹, Н. П. Мишуров^{1*}, Н. В. Трубицын²,
В. Е. Таркинский²**

¹ФГБНУ «Росинформагротех» (пос. Правдинский, Россия)

²Новокубанский филиал ФГБНУ «Росинформагротех»
(г. Новокубанск, Россия)

*mishurov@rosinformagrotech.ru

Введение. В статье обоснована необходимость определения буксования колес сельскохозяйственного трактора при проведении его испытаний. Рассмотрены принципы работы и конструкция применяемых датчиков определения буксования ведущих колес (двигателей) при испытаниях тракторов и сельскохозяйственных машин, отмечены конструктивные особенности и характеристики распространенных датчиков буксования на основе вращающегося диска с прорезями через фиксированный угол. Проанализированы достоинства и выделены ключевые недостатки существующих датчиков: сложность монтажа, необходимость изготовления деталей крепления датчика под конкретную модель трактора. Целью исследования является разработка универсального датчика буксования, который легко монтируется и может использоваться при проведении испытаний колесных и гусеничных тракторов.

Материалы и методы. Предложено решение, определяющее положение ведущего колеса в трехмерном пространстве на основе инерциальной навигационной системы. Описаны принципы работы компонентов данной системы: акселерометра, гироскопа и магнетометра. Проанализированы основные применяемые математические цифровые фильтры ориентации для обработки «сырых» данных.

Результаты исследования. Разработана конструкция устройства определения буксования трактора, основным элементом которого является инерциальный датчик положения колеса. Обоснован выбор основных компонентов датчика: марка и модель инерциальной навигационной системы, цифровой фильтр ориентации и микроконтроллер для функционирования датчика. В результате исследований был сконструирован и изготовлен датчик положения ведущего колеса на базе инерциальной навигационной системы MPU-9250 и микроконтроллера STM32F405. Разработано программное обеспечение датчика на языке С. Для обработки данных в реальном времени реализован цифровой фильтр на основе алгоритма Мэджвика.

Обсуждение и заключения. Датчик буксования колес трактора на основе инерциальной навигационной системы лишен основных недостатков широко распространенных датчиков ведущих колес. К преимуществам датчика относятся простота монтажа, беспроводной способ передачи данных.



Ключевые слова: буксование, испытания, инерциальная навигация, инерциальная навигационная система, фильтр Мэджвика, кватернион

Для цитирования: Применение инерциальной навигации для определения буксования сельскохозяйственных тракторов / В. Ф. Федоренко [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 1. С. 8–23. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.008-023

Application of Inertial Navigation for Determining the Slippage of Agricultural Tractors

V. F. Fedorenko^a, N. P. Mishurov^{a*}, N. V. Trubitsyn^b,
V. Ye. Tarkivskiy^b

^a*RosInformAgroTech (Pravdinskiy, Russia)*

^b*Novokubansk Branch of RosInformAgroTech
(Novokubansk, Russia)*

**mishurov@rosinformagrotech.ru*

Introduction. The article substantiates the necessity of determining the slippage of the tractor wheels during testing. The principle of operation and design of the sensors used to determine the slippage of the driving wheel in the testing of tractors and agricultural machines are considered; design features and characteristics of common shunting sensors based on a rotating disk with slots through a fixed angle are noted. The authors analyzed advantages and key disadvantages of existing sensors, such as the complexity of mounting and the need to manufacture the sensor mounting parts for a specific tractor model. The aim of the study is to develop a universal slip sensor for testing wheel and tracked tractors.

Materials and Methods. The proposed solution determines the positions of the driving wheel in three-dimensional space on the basis of the inertial navigation system. The principles of operation of inertial navigation system components are described. The system consist of an accelerometer, a gyroscope and a magnetometer. The basic mathematical digital orientation filters applied for processing raw data are analyzed.

Results. The design of the tractor slip determination device is developed. The main element of the mechanism is an inertial wheel position sensor. The selection of the main components of the sensor is substantiated: name and model of the inertial navigation system, the digital orientation filter and the microcontroller for the functioning the sensor. As a result of the research, the position sensor of the driving wheel was designed and manufactured on the basis of the MPU-9250 inertial navigation system and the STM32F405 microcontroller. The sensor software was developed in C language. A digital filter was based on the Madgwick algorithm for real-time data processing.

Discussion and Conclusions. The result of the research was the development of a sensor for slipping the tractor wheels based on an inertial navigation system. This type of sensor is devoid of the main disadvantages of the widely used sensors of driving wheels. The advantages of the sensor are easy installation and method of wireless data transfer.

Keywords: slipping, testing, inertial navigation, inertial navigation system, Madgwick filter, quaternion

For citation: Fedorenko V. F., Mishurov N. P., Trubitsyn N. V., Tarkivskiy V. Ye. Application of Inertial Navigation for Determining the Slippage of Agricultural Tractors. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(1):8–23. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.008-023

Введение

Буксование движителей трактора или самоходной машины возникает в следующих случаях: при трогании с места; при движении по поверхно-

сти, имеющей низкие сцепные свойства (влажный грунт, пахота, дорога во время или после дождя, гололед, снег); при загрузке энергосредства (выполнении работ) и т. д. Данный процесс

приводит к повышенному износу шин или гусениц, потере управляемости, перерасходу топлива и повреждению структуры почвы.

При проведении тяговых испытаний тракторов и энергетической оценки сельскохозяйственных машин одним из определяемых показателей также является текущая величина буксования движителей [1]. В соответствии с требованием стандарта ГОСТ 30745-2001¹, максимальное тяговое усилие, развиваемое на крюке трактора, должно ограничиваться началом неустойчивой работы двигателя, или буксованием. Предельное значение буксования не должно превышать на треках 7 % – для гусеничных тракторов, 15 % – для колесных и гусеничных с эластичной (резиновой) гусеницей; на почвенных фонах – 15 % и 30 % соответственно. Буксование движителей определяется по формуле (1):

$$\delta = \left(1 - \frac{n'_0}{n_0}\right) \cdot 100, \quad (1)$$

где n'_0 , n_0 – частота вращения ведущего колеса при движении трактора без нагрузки и с нагрузкой на крюке соответственно при одной и той же длине гона, мин⁻¹.

Как правило, определение буксования трактора не ограничивается опре-

делением буксования одного движителя, а вычисляется как среднее значение по формуле:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\delta_i), \quad (2)$$

где $\bar{\delta}$ – среднее буксование по всем движителям; n – количество движителей; δ_i – буксование i -го движителя.

Установка дополнительного устройства позволяет определять величину коэффициента буксования непосредственно в процессе движения. Разработка такого устройства определения коэффициента буксования является важной задачей при испытаниях тракторов и самоходной сельскохозяйственной техники. Устройство должно определять текущую величину буксования движителей вне зависимости от их типа (колеса, гусеницы) и колесной формулы при движении трактора с различной нагрузкой.

Обзор литературы

Как правило, задачу определения коэффициента буксования движителей решают традиционным способом – установкой датчика определения угла поворота колеса трактора²⁻⁵ (рис. 1) [2–4].

Основным элементом такого датчика является диск с фрезерованными через одинаковый угол вырезами 1. В большинстве случаев диск имеет 24

¹ ГОСТ 30745-2001 (ИСО 789-9-90) «Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей». М. : Издательство стандартов, 2002. 11 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200030187>

² Таран Д. А., Таран А. Д. Устройство для определения буксования колесных тракторов с одной ведущей осью // Концепции фундаментальных и прикладных научных исследований : сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. Казань : Этерна, 2017. С. 56–58. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28374134>

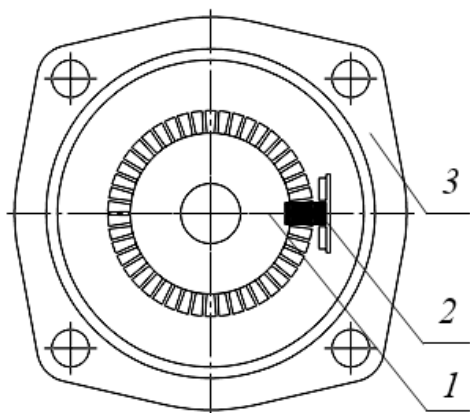
³ Лопарев А. А., Комкин А. С. Исследование буксования ведущих колес трактора в транспортно-технологическом сельскохозяйственном агрегате // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики : мат-лы IX Междунар. науч.-практ. конф. «Наука – Технология – Ресурсосбережение». Киров : Вятская ГСХА, 2016. С. 158–161. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27287773>

⁴ Венглинский А. М. Контроль буксования колесных тракторов МТЗ при возделывании сельскохозяйственных культур // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики : мат-лы IV Междунар. науч.-практ. конф. «Наука – Технология – Ресурсосбережение». Киров : Вятская ГСХА, 2011. С. 10–12. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28937268>

⁵ Лопарев А. А., Комкин А. С., Фасхутдинов М. Х. Исследование процесса буксования гусенично-колесных пропашных тракторов // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики : мат-лы VII Междунар. науч.-практ. конф. «Наука – Технология – Ресурсосбережение». Киров : Вятская ГСХА, 2014. С. 154–157. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27464943>



или 36 вырезов. Соответственно, точность (дискретность) датчика составляет 15° или 10° . Диск соединен гибкой муфтой со ступицей колеса и вращается вместе с ней. Корпус датчика 3 фиксируется неподвижно. Скорость вращения диска и, соответственно, движителя определяется количеством электрических импульсов за единицу времени, формируемых электронной схемой датчика при прохождении вырезов через оптическую пару 2. Электрические импульсы от датчика передаются по проводам и фиксируются в измерительной информационной системе, где определяется их период (количество за некоторый временной интервал), а также рассчитывается угловая скорость и частота вращения ротора датчика и, соответственно, движителя.



Р и с. 1. Устройство датчика буксования колес:
1 – диск с вырезами; 2 – оптическая пара;
3 – корпус датчика

F i g. 1. Wheel slip sensor design:
1 – cut-out disk; 2 – optical pair;
3 – sensor body

При использовании датчика такого типа буксование рассчитывается по формуле:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(1 - K_{\delta i} \cdot \frac{I_{nc}}{I_{kci}} \right) \cdot 100, \quad (3)$$

где $\bar{\delta}$ – текущее буксование всех ведущих колес, %; n – количество движителей; $K_{\delta i}$ – калибровочный коэффициент буксования i -го движителя, полученный по формуле (1) при проезде трактора по отмеренному участку с ровным покрытием без нагрузки; I_{kci} – количество импульсов, полученных с датчика i -го ведущего колеса за заданный интервал времени, имп; I_{nc} – количество импульсов, полученных с датчика пройденного пути.

В качестве датчика пройденного пути используется 5-е колесо, дополнительно установленное на тракторе.

В испытательных центрах для проведения испытаний тракторов и сельскохозяйственной техники широкое распространение получила измерительная информационная система ИП-264⁶. В комплект данной системы входят датчики оборотов для измерения частоты вращения ведущих колес ИП-268 (рис. 2).



Р и с. 2. Датчик оборотов ИП-268

F i g. 2. IP-268 speed sensor

Для установки датчика на испытуемый трактор необходимо соблюдать определенные требования:

– датчик должен быть закреплен так, чтобы избежать вращения его корпуса;

⁶ Федоренко В. Ф., Трубицын Н. В. Современные информационные технологии при испытаниях сельскохозяйственной техники: науч. аналит. обзор. : монография. М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2015. 140 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26212773>

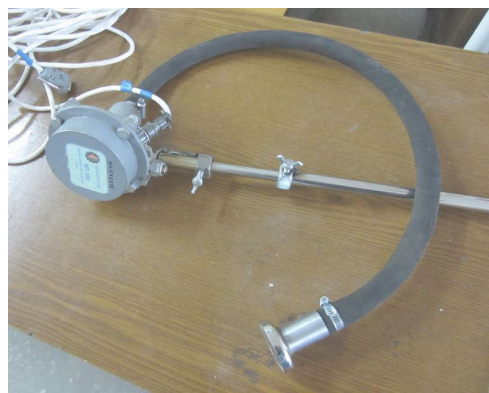


Р и с. 3. Монтаж датчика ИП-268 на тракторах New Holland t9.505 и Case STX-500
F i g. 3. Installation of IP-268 sensor on New Holland t9.505 and Case STX-500 tractors

– должна быть обеспечена гибкая связь между ступицей колеса и ротором датчика для передачи вращения колеса.

Для решения первой задачи изготавливаются штанги-фиксаторы, устанавливаемые на трактор и жестко фиксирующие датчики (рис. 3). Главная сложность заключается в необходимости изготовления штанги-фиксатора под каждую конкретную модель трактора. В некоторых случаях для установки штанги-фиксатора требуется также подготовить испытываемый трактор, например, просверлить отверстия для крепежа.

Для передачи вращения колеса к датчику присоединяют гибкие штанги с крепежной скобой или неодимовым магнитом (рис. 4).



Р и с. 4. Датчик ИП-268 с муфтой на основе неодимового магнита

F i g. 4. IP-268 sensor with a coupling based on neodymium magnet

Для передачи сигнала от датчика используются информационные кабе-



ли, которые должны быть аккуратно уложены на тракторе, чтобы не создавать помех обслуживающему персоналу и обеспечивать надежную связь между датчиком и измерительной информационно-системой.

Анализ источников показал, что за рубежом применяются датчики буксования для сельскохозяйственной техники с конструкцией, аналогичной российской. В качестве устройства, считающего обороты двигателя, применяются различные энкодеры [5] или пьезоэлектрические датчики [6–8]. За рубежом датчикам буксования присущи те же недостатки, что и российским: необходимость неподвижного закрепления корпуса датчика, прокладка информационных кабелей.

В работе А. Винко⁷ предлагается конструкция экспериментального датчика для определения буксования. Он представляет собой установленный на колесо трехосевой акселерометр для фиксации изменения вектора силы тяжести и последующего расчета скорости вращения колеса. Для обработки показаний предлагается использовать расширенный фильтр Калмана. Отмечен недостаток использования акселерометра: фиксация вибрации колеса во всех плоскостях приводит к большой ошибке при вычислениях. Обработка данных после эксперимента происходит на персональном компьютере, что исключает использование такого решения в режиме реального времени.

Таким образом, проблема определения буксования трактора при испытаниях в России и за рубежом решается оборудованием трактора датчиками определения угла положения ведущих колес (двигателей), что является достаточно трудоемкой задачей, требующей высокой квалификации персонала и значительной подготовительной работы.

Целью исследований является разработка универсального датчика буксования, который легко устанавливается на тракторе и не требует трудоемкой подготовки при проведении испытаний.

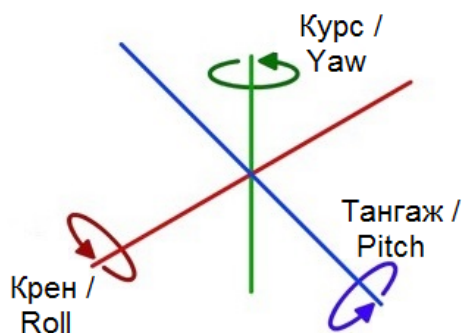
Материалы и методы

Существующие методы определения буксования требуют измерять частоту вращения движителя. На основании этих данных рассчитывается теоретический пройденный путь и сравнивается с фактически пройденным расстоянием за единицу времени (3). Вращение движителя можно вычислить, определив изменение его положения в пространстве путем непрерывного измерения угла относительно оси вращения (ступицы).

Решение этой задачи возможно с помощью новейшей технологии – инерциальной навигационной системы (ИНС).

ИНС предназначены для определения положения тела в пространстве и имеют преимущество в виде полной автономности: измеряемый объект не ограничен конкретной средой, расположением, направлением движения. ИНС состоит из акселерометра, гироскопа и магнитного компаса (магнетометра), позволяющих отслеживать вращательные и поступательные движения. Для определения координат в трехмерном пространстве оси датчиков расположены взаимно перпендикулярно. Современные устройства ИНС также включают в себя трехосный магнитометр, определяющий положение измеряемого объекта в горизонтальной плоскости (относительно поверхности земли), – аналог компаса. ИНС используют систему отчета, известную как «курс, тангаж, крен» (AHRS – Attitude and Heading Reference Systems), и в состоянии обеспечить полное измерение ориентации относительно силы тяжести и земного магнитного поля (рис. 5).

⁷ Vinko A. Wheel sleep detection by using wheel-mounted inertial sensor // 31th Danubia-Adria Symposium : Kempen University. 2014. P. 2.



Р и с. 5. Углы, описывающие изменение положения тела в пространстве

F i g. 5. The angles describing the change in the position of the body in space

Акселерометр измеряет ускорение, действующее на датчик, и таким образом получает проекцию тела относительно земли – отклонение (вращение) по оси X и отклонение (вращение) по оси Y . Заметим, что вращение по оси Z по данным акселерометра получить невозможно.

Вращение по любой из осей координат можно определить с помощью гироскопа. Этот датчик измеряет угловую скорость, т. е. скорость поворота вокруг оси. При этом показания сильно зависят от обработки получаемых данных: чем больше скорость опроса, тем больше точность результатов. Каждый опрос датчика дает мгновенные значения угловой скорости, однако между опросами данная скорость может быть неравномерной. Кроме этого, необходимо знать точное время между опросами датчика для интегрирования данных по углу поворота.

Для фиксации вращения по оси Z подходит магнитометр – датчик, измеряющий магнитное поле. Известно, что земля имеет свое магнитное поле, и магнитометр в роли компаса способен определить направление на север.

Благодаря современному уровню развития технологий изготовления микросхем все три датчика komponуются в одном миниатюрном устройстве, которое получило название микроэлек-

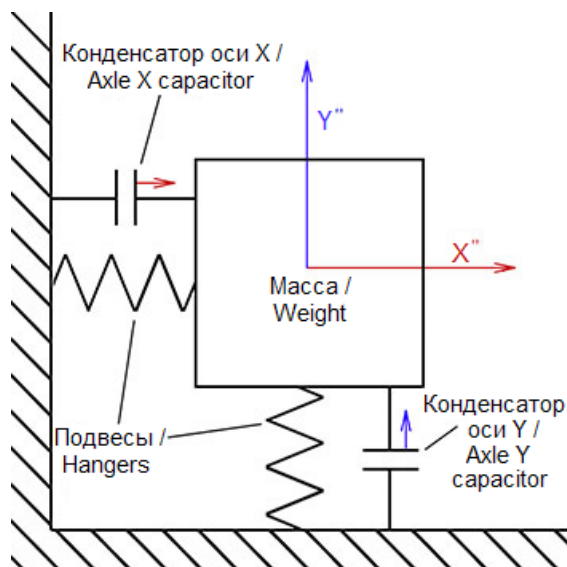
тромеханическое устройство (MEMS), что позволяет использовать ИНС в самых различных областях.

В датчиках, измеряющих пространственное перемещение, используются подвижные массы в качестве чувствительных элементов. Под действием сил инерции, возникающих при изменении параметров движения объекта, такая масса перемещается на определенную величину, которая измеряется и преобразуется в электронный вид. MEMS-акселерометры устроены таким образом, что отделить друг от друга составные части (грузик, подвес, корпус и обкладки конденсатора) практически невозможно [9]. Эти устройства обычно изготавливают на кремниевой подложке с помощью технологии микрообработки. Типичные размеры микромеханических элементов лежат в диапазоне от 1 мкм до 100 мкм, тогда как размеры кристалла микросхемы – от 20 мкм до 1 мм.

Работа акселерометров, используемых в MEMS-микросхеме, основана на конденсаторном принципе. Подвижная часть системы – классический грузик на подвесах. При наличии ускорения грузик смещается относительно неподвижной части акселерометра. Обкладка конденсатора, прикрепленная к грузику, смещается относительно обкладки на неподвижной части (рис. 6). Емкость меняется, при неизменном заряде меняется напряжение – это изменение можно измерить и рассчитать смещение грузика. После этого, зная массу грузика и параметры подвеса, легко найти ускорение.

В MEMS-микросхемах реализован еще один датчик – электронный гироскоп. Принцип работы электронного гироскопа заключается в измерении силы Кориолиса, действующей на активный элемент внутри датчика.

Для реализации магнитометров используется анизотропная магнитно-резистивная технология. Принцип работы таких датчиков основан на из-



Р и с. 6. Схема электронного акселерометра
F i g. 6. The scheme of an electronic accelerometer

менении сопротивления тонкой полоски ферромагнитного материала под действием внешнего магнитного поля, перпендикулярного направлению тока, проходящего по этой полоске.

Акселерометр, гироскоп и магнетометр по отдельности не дают полного набора данных, по которым можно определить ориентацию тела в пространстве, но совместное использование данных позволяет добиться высокой точности. Для обработки данных от акселерометра, гироскопа и магнетометра применяется специализированный цифровой фильтр – фильтр ориентации. Задача данного фильтра состоит в вычислении единой оценки ориентации, полученной путем объединения и обработки данных акселерометра, гироскопа и магнетометра.

Большинство фильтров ориентации построены на использовании фильтра Калмана [10]. Данный фильтр является точным и эффективным, однако имеет ряд недостатков. Он сложен в реали-

зации, поскольку линейная регрессия итерации, которая является основополагающим компонентом для процессов Калмана, а также требования к частоте дискретизации, значительно повышают требования к вычислительной мощности⁸ [11–12]. Отношение, описывающее вращающуюся кинематику в трех измерениях, как правило, требует больше векторов состояния и реализации расширенного фильтра Калмана. Требование существенной вычислительной мощности для реализации решений Калмана является основанием для реализации альтернативных решений [13–14].

Одним из простых фильтров ориентации является комплементарный альфа-бета фильтр. Данный фильтр применяется к двум величинам, измеряемым разными датчиками, и корректирует одну из них так, что она медленно стремится ко второй. В измерительном цикле фильтр реализуется следующим образом:

⁸ Lefebvre T., Bruyninckx H., De Schutter J. Nonlinear Kalman filtering for force-controlled robot tasks : A monograph // Springer Tracts in Advanced Robotics (STAR), 2005. Vol. 19. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19587769>

$$A1 = \frac{A1 \cdot k + A2}{k + 1}, \quad (4)$$

где $A1$ – показания первого датчика; $A2$ – показания второго датчика; k – коэффициент влияния $A2$ на $A1$, $k \gg 1$.

При этом влияние величины $A2$ на $A1$ пропорционально разнице между ними и определяется коэффициентом k : чем больше коэффициент, тем слабее влияние.

Некоторые решения основаны на нечеткой обработке данных или на фиксации фильтра в пользу акселерометра для определения ориентации на малых угловых скоростях и интегрирования измерений гироскопа при обнаружении высоких угловых скоростей. Такой подход прост, но может быть эффективным только при ограниченных условиях эксплуатации. Многие исследователи предлагали альтернативный подход, при котором фильтр достигает оптимального синтеза данных измерений на всех угловых скоростях [15]. Тем не менее процесс требует аппроксимации методом наименьших квадратов, что также добавляет вычислительной нагрузки. Получил распространение вариант комплементарного фильтра Махони, который, как показывает практика, является эффективным и действенным решением [16]. Однако его точность подходит только для ИНС без магнитометра.

Широко используется также фильтр ориентации, разработанный С. Мэдджвиком⁹ [17]. Данный фильтр не так требователен к вычислительным ресурсам и обеспечивает высокую точность на низких частотах опросов акселерометра, гироскопа и магнетометра. В основу реализации фильтра положен алгоритм оптимизации методом гра-

диентного спуска, достаточно простой в реализации и вычислениях. Существует реализация фильтра как на основе данных акселерометра и гироскопа, так и на основе данных акселерометра, гироскопа и магнетометра (рис. 7).

На выходе фильтра Мэдджвика получается нормализованный кватернион – четырехмерное комплексное число, которое может быть использовано для представления ориентации остроконечного тела или координат в трехмерном пространстве¹⁰. Из кватерниона легко получить все углы, описывающие положение тела в пространстве (курс, тангаж, крен).

Тангаж (град.) вычисляется по формуле:

$$\text{pitch} = \arcsin(-2 \cdot (q1 \cdot q3 - q0 \cdot q2)), \quad (5)$$

где $q0$, $q1$, $q2$, $q3$ – значения компонентов кватерниона.

Результаты исследования

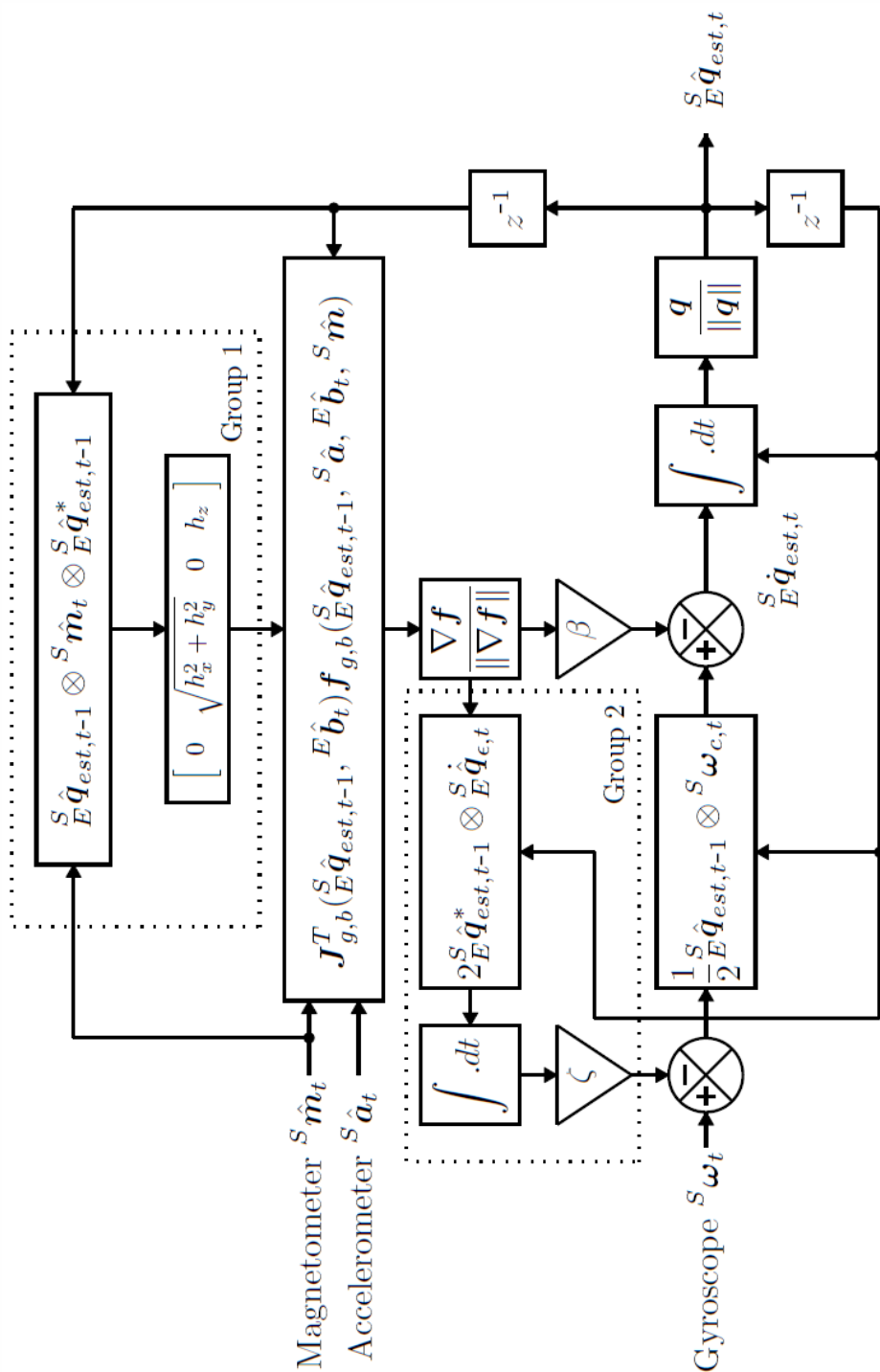
Была разработана конструкция и изготовлен датчик положения движителя трактора (рис. 8). Основным элементом датчика является ИНС на основе MEMS-микросхемы MPU-9250.

MPU-9250¹¹ – микросхема размерами $3 \times 3 \times 1$ мм. В корпусе устройства объединены два кристалла: на одном размещен трехосевой гироскоп и трехосевой акселерометр, а на втором – трехосевой магнитометр AK8963 фирмы Asahi Kasei Microdevices. Данные с гироскопа, акселерометра и магнитометра оцифровываются встроенным 16-битным аналого-цифровым преобразователем, обрабатываются цифровым процессором DMP (Digital Motion Processor) фирменными алгоритмами Motion Fusion и передаются внешнему управляющему устройству по шине данных I²C или SPI.

⁹ Madgwick S. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. URL: http://x-io.co.uk/res/doc/madgwick_internal_report.pdf

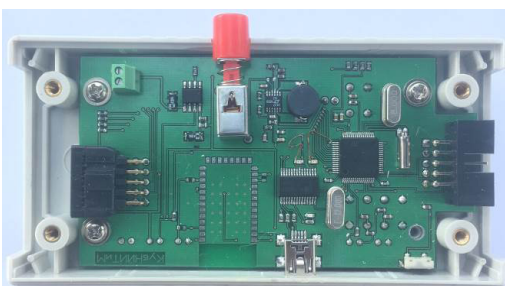
¹⁰ Конвей Дж. Х., Смит Д. А. О кватернионах и октавах, об их геометрии, арифметике и симметриях. М. : МЦНМО, 2009. 184 с. URL: http://www.vixri.com/d/Konvey%20Dzhon%20X.%20_O%20kvaternionax%20i%20oktavax.pdf

¹¹ MPU-9250. Product Specification. Revision 1.1. URL: <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/9-axis/mpu-9250>



Р и с. 7. Блок-схема полного фильтра Мэдживика

Fig. 7. The block diagram of a full Madgwick filter



Р и с. 8. Инерциальный датчик буксования трактора ИП-291
F i g. 8. IP-291 inertial wheel slip sensor

Датчик буксования состоит из следующих основных компонентов:

- MEMS-микросхема ИНС MPU-9250;
- процессор STM32F405;
- модуль беспроводной связи Wi-Fi ESP8266;
- Li-ion аккумулятор;
- корпус.

Для обработки данных MPU-9250 внутри датчика используется мощный микроконтроллер STM32F405.

Питание датчика осуществляется аккумулятором Li-ion емкостью 3 000 мА·ч с системой контроля заряда.

Важной особенностью датчика является применение модуля беспроводной связи ESP8266 с подключаемой внешней антенной для передачи данных в измерительную информационную систему.

MEMS-микросхема MPU-9250 формирует исходные данные о положении в пространстве со скоростью 1 000 раз/сек. Затем они передаются в контроллер STM32F405 по шине SPI на рабочей частоте 1 МГц. Для обработки данных в контроллере реализован алгоритм на основе фильтра Мэджвика, который позволяет добиться среднеквадратического отклонения при определении углов $0,8^\circ$ в подвижном состоянии. Скорость вращения датчика определяется на основании изменения его положения в пространстве, а именно крена и тангажа.

Крен колеса может дать незначительную погрешность для расчета, поскольку проекция колеса на вертикальную плоскость при отклонении от вертикального положения представляет собой не окружность, а овал. Однако значение тангажа при любом значении крена, отличном от 90° , будет всегда совпадать в 4-х положениях при полном обороте колеса: 2-х вертикальных и 2-х горизонтальных. Учитывая также, что в нормальных условиях колеса трактора имеют незначительное отклонение от вертикали, значением крена можно пренебречь.

Мгновенные значения углов по тангажу и крену и рассчитанная текущая частота вращения колеса передаются по беспроводному каналу связи Wi-Fi на измерительную систему для расчета коэффициента буксования. В зависимости от типа измерительной системы данные передаются по протоколу Modbus RTU или DCON.

Программное обеспечение контроллера STM32F405 датчика написано на языке C в среде разработки MikroC¹². При написании программы были использованы открытые исходные коды реализации фильтра Мэджвика на языке C^{#13}.

Программа датчика позволяет гибко настраивать выходной формат данных для измерительных информационных систем. Выходные данные могут быть

¹² Свидетельство официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа управления бесконтактным датчиком ИП-291 / В. Е. Таркинский. Заявитель и правообладатель ФГБНУ «Росинформагротех» (RU). № 2017619099 ; заявл. 11.09.17 ; опубл. 23.11.17. Реестр программ для ЭВМ. 1 с.

¹³ Open source IMU and AHRS algorithms. URL: <http://x-io.co.uk/open-source-imu-and-ahrs-algorithms>



**Краткая техническая характеристика датчиков ИП-268 (классический)
и ИП-291 (на основе ИНС)**
Brief technical specification of IP-268 (classical) and IP-291 (based on INS) sensors

Наименование показателя / Indicator name	Значение / Value	
	ИП-268 / IP-268	ИП-291 / IP-291
Напряжение питания, В / Supply voltage, V	От 12 до 24 / From 12 to 24	5
Потребляемая мощность, Вт / Power consumption, W	≤ 1	≤ 1
Количество импульсов на один оборот на 360°, шт. / Number of pulses per revolution 360°, units	48	От 1 до 360 / From 1 to 360
Точность определения времени, мс / Time accuracy, ms	–	1
Расчет мгновенной угловой скорости / Calculation of instantaneous angular velocity	Нет / No	Есть / Yes
Температура окружающей среды, °C / Ambient temperature, °C	От +1 до +60 / From +1 to +60	От +1 до +60 / From +1 to +60
Габаритные размеры, мм / Overall dimensions, mm	135x125x125	120x60x30
Масса, кг / Weight, kg	1,5	0,3

представлены в виде показаний счетчика интервалов через заданный угол. В таком случае не требуется никаких изменений в программе измерительной информационной системы, поскольку система воспринимает подключенный датчик за ИП-268.

Для работы датчик ИП-291 достаточно закрепить на диске ведущего колеса трактора (рис. 9).



Р и с. 9. Датчик ИП-291, установленный на колесе МТЗ-82

Fig. 9. IP-291 sensor installed on wheel of MTZ-82 tractor

При проведении сравнительных испытаний датчика буксования на ведущем колесе трактора одновременно были установлены два датчика: ИП-291 (экспериментальный) и ИП-268 (базовый). Оба датчика подключены к измерительной информационной системе ИП-264. Датчик ИП-291 настроен на счет импульсов с дискретностью 10°; ИП-268 снабжен диском с 36 прорезями также через 10°. Во время испытаний система ИП-264 рассчитывала теоретический пройденный путь и буксование на основании данных датчиков. Трактор сделал 3 заезда на участке 50 м. Для определения реального пройденного пути использовалось 5-е колесо. Пройденный путь рассчитывался по формуле:

$$S = 2\pi \cdot R \cdot (n \cdot \Delta) / 360, \quad (6)$$

где R – радиус колеса, м; n – количество импульсов, полученных от датчика, шт.; Δ – цена импульса, град.

Буксование трактора рассчитывалось по формуле (3).

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

**Результаты сравнительных испытаний датчиков
ИП-268 (классический) и ИП-291 (на основе ИНС)**

The results of comparative tests of IP-268 (classical) and IP-291 (based on INS) sensors

№ опыта / Test number	ИП-268 / IP-268		ИП-291 / IP-291	
	Теоретический путь, м / Theoretical path, m	Буксование, % / Slipping, %	Теоретический путь, м / Theoretical path, m	Буксование, % / Slipping, %
1	51,2	2,34	51,3	2,53
2	51,7	3,29	52,0	3,84
3	50,8	1,57	50,9	1,77

Результаты сравнительных испытаний приведены в табл. 2.

Данные испытания показали, что точность определения буксования у датчика ИП-291 и датчика ИП-268 не имеет значимых различий. Время монтажа ИП-291 составило 3 мин, ИП-268 – 2 ч с учетом установки штанги и прокладки информационных кабелей. Для разработанного датчика ИП-291 установка фиксирующей штанги и прокладка кабелей не требуется.

Обсуждение и заключения

Инерциальный датчик буксования трактора по сравнению со стандартными решениями имеет следующие преимущества:

- может использоваться на любых видах тракторов и сельскохозяйственной техники;
- не требует изготовления фиксаторов под конкретную модель трактора;
- не требует вмешательства в конструкцию трактора для установки фиксатора;

- не содержит вращающиеся части;
- не требует изготовления и установки гибкой муфты для соединения ступицы колеса и ротора датчика;

– не требует соединительных информационных кабелей для связи с измерительной информационной системой;

- позволяет настраивать дискретность измерения угла поворота колеса в зависимости от конкретных требований к точности;

– рассчитывает мгновенную угловую скорость ведущего колеса для индикации мгновенной скорости трактора.

Применение датчика ИП-291 позволяет значительно сократить время подготовки машины к испытаниям. Исключение фиксатора, соединительной муфты и кабелей связи упрощает монтаж и удешевляет проведение испытаний сельскохозяйственной техники.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кузнецов Н. Г., Гапич Д. С., Ширяева Е. В. К вопросу об определении допустимого коэффициента буксования полноприводного колесного трактора // Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2014. Т. 34, № 2. С. 176–179. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21624493>
2. Лопарев А. А., Венглинский А. М., Комкин А. С. Исследование процесса буксования ведущих колес трактора МТЗ-100 в режиме трогания с места и разгона // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 1. С. 18–20. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21048083>
3. Лопарев А. А., Венглинский А. М., Комкин А. С. Снижение буксования колесных универсально-пропашных тракторов при выполнении технологических операций // Технология колесных и гусеничных машин. 2014. № 4. С. 30–35. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21955470>



4. **Горшков Ю. Г., Четыркин Ю. Б., Калугин А. А.** Регистрирующий комплекс для исследования буксования и КПД дифференциала и движителя колесной машины // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 11. С. 13–15.
5. **Reina G.** Methods for wheel slip and sinkage estimation in mobile robots // Robot Localization and Map Building. 2010. March. P. 561–578. DOI: 10.5772/9279
6. Slippage, detection with piezoresistive tactile sensors / A. Rocco [et al.] // Sensors. 2017. August. P. 15. DOI: 10.3390/s17081844
7. Current-based slippage detection and odometry correction for mobile robots and planetary rovers / L. Ojeda [et al.] // IEEE Transactions on Robotics. 2006. Vol. 22, no. 2. P. 366–378. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1618745>
8. **Rovira-Más F.** Sensor architecture and task classification for agricultural vehicles and environments // Sensors. 2010. № 10 (12). С. 11226–11247. DOI: 10.3390/s101211226
9. Разработка системы стабилизации угла отклонения балансирующего робота / Д. С. Федоров [и др.] // Автоматика и программная инженерия. 2015. Т. 12, № 2. С. 16–34. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25386110>
10. **Куликова М. В., Куликов Г. Ю.** Численные методы нелинейной фильтрации для обработки сигналов и измерений // Вычислительные технологии. 2016. № 4. С. 64–98. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26584489>
11. **Кудрявцева И. А.** Анализ эффективности расширенного фильтра Калмана, сигма-точечного фильтра Калмана и сигма-точечного фильтра частиц // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2016. Т. 224, № 2. С. 43–51. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25811419>
12. **Marcovich L.** Inferences from optimal filtering equation, Kalman's filter and theorem on normal correlation // Управление, информация и оптимизация. 2014. С. 40. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22012842>
13. **Куликов Р. С.** Сравнение точностей нелинейной фильтрации в расширенном фильтре Калмана и в Ансентном фильтре // Радиотехника. 2016. № 9. С. 135–140. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27443008>
14. **Ontiveros-Gallardo S. E., Kober V.** Objects tracking with adaptive correlation filters and Kalman filtering // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2015. 95980X. DOI: 10.1117/12.2187109
15. **Kulikova M. V., Tsyganova J. V.** Constructing numerically stable Kalman filter-based algorithms for gradient-based adaptive filtering // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2015. № 11. P. 1411–1426. DOI: 10.1002/acs.2552
16. **Mahony R., Hamel T., Pfimlin J.-M.** Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group // IEEE Transactions on Automatic Control. 2008. Vol. 53, no. 5. P. 1203–1218. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00488376>
17. **Кузнецов А. В., Павловский А. М.** Повышение точности инерциального измерительного модуля на MEMS-датчиках // Вісник Національного технічного Університету України «Київський політехнічний інститут». 2015. Т. 50, № 2. С. 5–11. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26154868>

Поступила 22.11.2017; принята к публикации 12.12.2017; опубликована онлайн 20.03.2018

Об авторах:

Федоренко Вячеслав Филиппович, директор ФГБНУ «Росинформагротех» (141261, Россия, пос. Правдинский, ул. Лесная, д. 60), академик РАН, доктор технических наук, профессор, ResearcherID: A-9022-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6398-4463>, fedorenko@rosinformagrotech.ru

Мишуров Николай Петрович, заместитель директора по научной работе, ФГБНУ «Росинформагротех» (141261, Россия, пос. Правдинский, ул. Лесная, д. 60), кандидат технических наук, ResearcherID: A-8970-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1058-6952>, mishurov@rosinformagrotech.ru

Трубицын Николай Владимирович, заместитель директора по науке, Новокубанский филиал ФГБНУ «Росинформагротех» (352243, Россия, г. Новокубанск, ул. Красная, д. 15), кандидат технических наук, ResearcherID: W-4426-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7451-9831>, Trubicin@yandex.ru

Таркивский Виталий Евгеньевич, заведующий лабораторией стандартизации и метрологии, Новокубанский филиал ФГБНУ «Росинформагротех» (352243, Россия, г. Новокубанск, ул. Красная, д. 15), кандидат технических наук, ResearcherID: W-4417-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8488-0011>, Tarkivskiy@yandex.ru

Вклад соавторов:

В. Ф. Федоренко: научное руководство, формулирование основной концепции исследования, подготовка начального варианта текста и формирование выводов; Н. П. Мишуров: проведение критического анализа исследования и доработка текста; Н. В. Трубицын: литературный и патентный анализ, проведение теоретических исследований по подбору типа ИНС, конструирование датчика буксования колеса трактора; В. Е. Таркивский: проведение теоретических исследований и обоснование выбора фильтра ориентации ИНС, программирование микроконтроллера, визуализация, верстка и редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Kuznetsov N. G., Gapich D. S., Shiryayeva Ye. V. [On issue of the determination of the allowable towards coefficient of a full-wheeled tractor]. *Izvestiya Nizhnevolzskogo agrouniversitetskogo kompleksa* = News of Lower Volga Agro-University Complex. 2014; 2(34):176–179. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21624493> (In Russ.)
2. Loparev A. A., Venglinsky A. M., Komkin A. S. Slipping process research of drive wheels of the MT3-100 tractor in breakaway and acceleration modes. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2014; 1:18–20. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21048083> (In Russ.)
3. Loparev A. A., Venglinsky A. M., Komkin A. S. Universal wheel cultivator tractor slipping reduction at fulfilling technological operations. *Tekhnologiya kolesnykh i gusenichnykh mashin* = Technology of Wheeled and Tracked Vehicles. 2014; 4:30–35. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21955470> (In Russ.)
4. Gorshkov Yu. G., Chetyrkin Yu. B., Kalugin A. A. The registration system for examining the slippage and efficiency of the differential and propeller of a wheeled vehicle. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2012; 11:13–15. (In Russ.)
5. Reina G. Methods for wheel slip and sinkage estimation in mobile robots. *Robot Localization and Map Building*. 2010; 3:561–578. DOI: 10.5772/9279
6. Romeo R. A., Oddo C. M., Carrozza M. C., Guglielmelli E., Zollo L. Slippage, detection with piezoresistive tactile sensors. *Sensors*. 2017; 8:15. DOI: 10.3390/s17081844
7. Ojeda L., Cruz D., Reina G., Borenstein J. Current-based slippage detection and odometry correction for mobile robots and planetary rovers. *IEEE Transactions on Robotics*. 2006; 22(2):366–378. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1618745>
8. Rovira-Más F. Sensor architecture and task classification for agricultural vehicles and environments. *Sensors*. 2010; 10(12):11226–11247. DOI: 10.3390/s101211226
9. Fedorov D. S., Ivoilov A. Yu., Zhmud V. A., Trubin V. G. Development of deflactioun angle stabilizing system for balansing robot. *Avtomatika i programnaya inzheneriya* = Automation and Software Engineering. 2015; 12(2):16–34. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25386110> (In Russ.)
10. Kulikova M. V., Kulikov G. Yu. Numerical methods for nonlinear filtering of signals and measurement. *Vychislitelnye tekhnologii* = Computing Technologies. 2016; 4:64–98. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26584489> (In Russ.)



11. Kudryavtseva I. A. Efficiency analysis of extended Kalman filtering, unscented Kalman filtering and unscented particle filtering. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii* = Scientific Bulletin of Moscow State Technical University of Civil Aviation. 2016; 224(2):43–51. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25811419> (In Russ.)
12. Marcovich L. Inferences from optimal filtering equation, Kalman's filter and theorem on normal correlation. *Upravleniye, informatsiya i optimizatsiya* = Management, Information and Optimization. 2014; 40. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22012842>
13. Kulikov R. S. Comparing of accuracy of nonlinear filtering in extended Kalman filter and in unscented filter. *Radiotekhnika* = Radiotechnics. 2016; 9:135–140. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=27443008> (In Russ.)
14. Ontiveros-Gallardo S. E., Kober V. Objects tracking with adaptive correlation filters and Kalman filtering. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2015. 95980X. DOI: 10.1117/12.2187109
15. Kulikova M. V., Tsyganova J. V. Constructing numerically stable Kalman filter-based algorithms for gradient-based adaptive filtering. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 2015; 11:1411–1426. DOI: 10.1002/acs.2552
16. Mahony R., Hamel T., Pflimlin J.-M. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2008; 53(5):1203–1218. Available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00488376>
17. Kuznetsov A. V., Pavlovskiy A. M. Improving the accuracy of inertial measurement unit on MEMS-sensor. *Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo Universitetu Ukraini "Kyivskiy politekhnichnyi institut"* = Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". 2015; 50(2):5–11. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26154868> (In Ukr.)

Submitted 22.11.2017; revised 12.12.2017; published online 20.03.2018

About the authors:

Vyacheslav F. Fedorenko, Director of the RosInformAgroTech (60 Lesnaya St., Pravdinskiy 141261, Russia), Academician of RAS, D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: A-9022-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6398-4463>, fedorenko@rosinformagrotech.ru

Nikolay P. Mishurov, Deputy Director for Scientific Work, RosInformAgroTech (60 Lesnaya St., Pravdinskiy 141261, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: A-8970-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1058-6952>, mishurov@rosinformagrotech.ru

Nikolay V. Trubitsyn, Deputy Director for Scientific Work, Novokubansk Branch of RosInformAgroTech (15 Krasnaya St., Novokubansk 352243, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: W-4426-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7451-9831>, Trubicin@yandex.ru

Vitaly Ye. Tarkivskiy, Head of the Laboratory of Standardization and Metrology, Novokubansk Branch of RosInformAgroTech (15 Krasnaya St., Novokubansk 352243, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: W-4417-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8488-0011>, Tarkivskiy@yandex.ru

Contribution of the co-authors:

V. F. Fedorenko: scientific management, formulating the research concept, writing the draft, and developing the conclusions; N. P. Mishurov: conducting critical analysis of research and finalizing the text; N. V. Trubitsyn: literary and patent analysis, theoretical research on the selection of INS type, design of a wheel traction sensor; V. Ye. Tarkivskiy: conducting theoretical studies and justifying the choice of ANS orientation filter, microcontroller programming, visualization, layout and text editing.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.



Ориентированная посадка луковиц катушечно-вильчатым высаживающим аппаратом

А. Г. Аксенов¹, П. А. Емельянов², А. В. Сибирёв^{1*}

¹ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (г. Москва, Россия)

²ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет» (г. Пенза, Россия)

*sibirev2011@yandex.ru

Введение. Существующие лукопосадочные машины не обеспечивают единичной подачи луковиц высаживающим (высевающим) аппаратом, что приводит к нарушению агротехнических требований посадки луковиц. Необходим поиск новых решений по сохранению положения луковиц в борозде донцем вниз и их равномерному распределению.

Материалы и методы. В статье представлена конструкция опытного образца посадочной машины, оснащенная катушечно-вильчатым высаживающим аппаратом для ориентированной посадки лука-севка в борозду. Исследования данного аппарата проводились на ровном участке, где в дни посадки измерялись физико-механические свойства почвы и показатели качества посадки лука-севка. Влияние скорости движения посадочного агрегата на качество посадки определялось изменением поступательной скорости движения посадочного агрегата в пределах от 0,8 м/с до 1,2 м/с с шагом 0,1 м/с; показатели качества посадки луковиц – раскрытием закрытой борозды.

Результаты исследования. В статье приведены результаты лабораторно-полевых исследований лукопосадочной машины, оснащенной катушечно-вильчатым высаживающим аппаратом для посадки лука-севка и экспериментально определены его оптимальные технологические параметры. Были определены количество луковиц, расположенных вешкой вверх (51 %) и равномерность посадки катушечно-вильчатым высаживающим аппаратом (79 %). Достижение данных показателей обеспечивается при поступательной скорости посадочной машины $V_m = 0,9–1,0$ м/с, высоте падения луковицы $H_A = 0,12$ м и частоте вращения высаживающего барабана $n_B = 0,47$ с⁻¹.

Обсуждение и заключения. Применение катушечно-вильчатого высаживающего аппарата позволяет повысить долю луковиц высаженных донцем вниз на 200 % по сравнению с ленточным аппаратом, а равномерность посадки луковиц – на 19 %.

Ключевые слова: высаживающий аппарат, катушечно-вильчатый аппарат, поступательная скорость движения, высота установки, частота вращения, лук-севок, ориентированная посадка

Для цитирования: Аксенов А. Г., Емельянов П. А., Сибирёв А. В. Ориентированная посадка луковиц катушечно-вильчатым высаживающим аппаратом // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 1. С. 24–35. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.024-035



Oriented Onion Sowing by a Forked-Roller Sowing Unit

A. G. Aksenov^a, P. A. Emelyanov^b, A. V. Sibirev^{a*}

^a*Federal Scientific Agroengineering Center VIM
(Moscow, Russia)*

^b*Penza State Agrarian University (Penza, Russia)*

*sibirev2011@yandex.ru

Introduction. The existing sowing machines do not provide a single feeding of the bulbs with a planting (sowing) unit that leads to a violation of the agrotechnical requirements of planting bulbs. It is necessary to search new solutions to preserve the position of the bulbs in the furrow with the bottom down and their regularly spaced distribution.

Materials and Methods. The article presents the design for a prototype for a planting machine equipped with a forked-roller sowing unit for orienting the onion-sowing into a furrow. Testing the forked-roller sowing unit were carried out on a flat area where the physical and mechanical properties of the soil were determined on the days of sowing, and the indices of the quality of the onion-sowing were determined. The study of the effect of the sowing machine speed on the quality of the onion-seed bulb landing was determined by the change in the translational speed of the sowing unit in the flat area of 0.8 m/s to 1.2 m/s with a variation interval of 0.1 m/s. The indicators of the quality of the planting of the bulbs were determined by the opening of the closed furrow. The results of laboratory-field studies of the planting machine prototype are presented.

Results. The results of laboratory-field studies of a planting machine equipped with a forked-roller sowing unit for planting onion bulbs are presented. The optimal technological parameters are determined experimentally. It was determined the number of bulbs that are for up is 51 % and the regularity of planting by the forked-roller sowing unit – 79 %. These figures are provided at the forward speed of the planting machine $V_M = 0.9–1.0$ m/s, the height of the fall of the bulb $H_A = 0.12$ m, and the rotation frequency of the landing drum $n_B = 0.47$ c⁻¹.

Discussion and Conclusions. The use of a forked-roller sowing unit makes it possible to increase the proportion of onions planted by bottom down by 200 %, and the uniformity of planting bulbs by 19 %, in comparison with a belt sowing unit.

Keywords: sowing unit, forked-roller unit, forward speed, installation height, rotation frequency, onion for sowing, oriented sowing

For citation: Aksenov A. G., Emelyanov P. A., Sibirev A. V. Oriented Onion Sowing by a Forked-Roller Sowing Unit. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(1):24–35. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.024-035

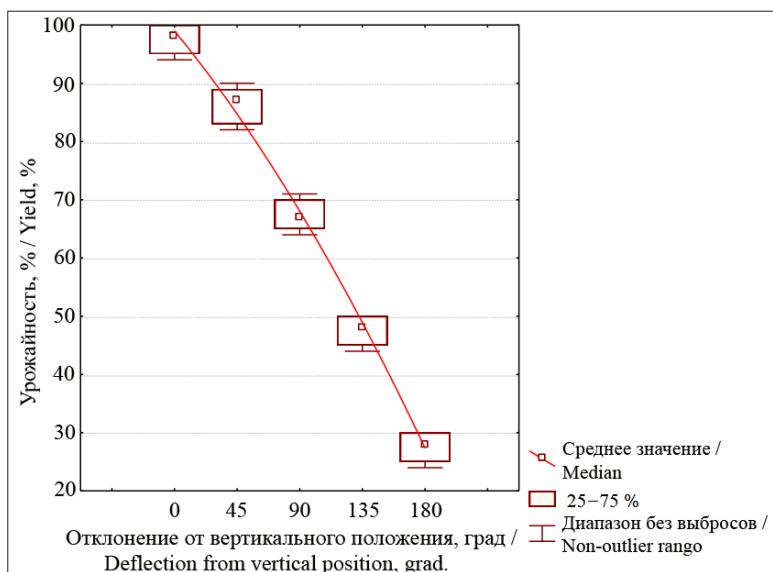
Введение

Самым распространенным способом, применяемым в средней полосе и северной части Российской Федерации является выращивание лука-репки из севка [1]. Посадка луковиц лука-севка в соответствии с существующими рекомендациями [2] является лимитирующим фактором снижения себестоимости произведенной продукции [3].

Современные средства механизации посадки луковиц не отвечают агротехническим требованиям и стандарту СТО АИСТ 5.6-2010 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины посевные и посадочные»¹, а именно не обеспечивают равномерность посадки луковиц и положение луковиц в борозде вешкой вверх [4].

Равномерность посадки луковиц существующими посадочными машинами

¹ СТО АИСТ 5.6-2010 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины посевные и посадочные». Показатели назначения. Общие требования. Введен 15.04.2001 г. М. : Изд-во стандартов, 2011. 27 с. URL: http://www.snti.ru/snips_sto-aist.htm



Р и с. 1. Зависимость урожайности репчатого лука от положения луковиц в борозде

F i g. 1. The influence of bulb position during planting on onion productivity

с ленточным высаживающим аппаратом не превышает 60 %; количество луковиц, ориентированных вешкой вверх, находится на уровне 15–20 %, донцем вверх – 10–15 %, что не соответствует агротехническим требованиям к посадке луковиц и приводит к снижению урожайности.

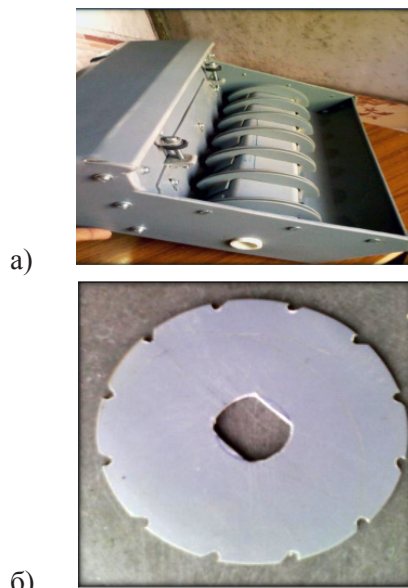
Цель работы – повысить качественные показатели посадки лука-севка катушечно-вилочатым высаживающим аппаратом, в соответствии с предъявляемыми агротехническими требованиями (положение луковиц в борозде вешкой вверх и равномерность распределения).

Обзор литературы

Анализ существующих посадочных машин и патентно-технической литературы позволил выявить недостатки конструкции высевальных и высаживающих аппаратов машин для посадки луковиц, которые не позволяют обеспечить качественное выполнение технологического процесса посадки лука-севка [5].

В дисковом высевальном аппарате [6] с горизонтальной осью вращения (рис. 2) высевальные диски установлены

на вращающемся вал и образуют ячейки для захвата луковиц лука-севка. В боковинах семенного ящика имеются прорези для установки высевального вала.



Р и с. 2. Дисковый высевальный аппарат: а) общий вид; б) высевальный диск

F i g. 2. Disk sowing unit:
a) general view; b) sowing disk



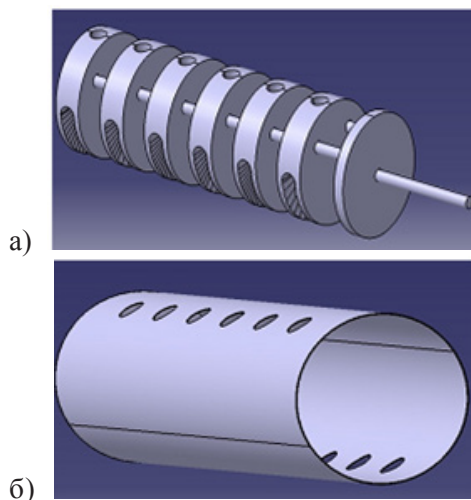
Опишем технологический процесс посадки лука-севка дисковым высевальным аппаратом с горизонтальной осью вращения.

Луковицы из семенного ящика направляются в пространство, образованное высевальными дисками и корпусом высевального аппарата.

При вращении высевальных дисков они увлекают и поворачивают луковицы вешкой вверх по ходу вращения барабана высевального аппарата. Дальнейшее вращение аппарата обуславливает выпадение луковиц из ячеек в результате их вращения по часовой стрелке и разворота вешкой вверх.

К отрицательным свойствам известной конструкции высевального аппарата следует отнести невозможность фиксации луковицы, что может привести к потере ее заданного ориентированного положения.

Одной из разновидностей дисковых высевальных аппаратов является аппарат, диск которого снабжен периферийными ячейками (рис. 3) [7].



Р и с. 3. Дисковый высевальный аппарат с периферийными ячейками: а) общий вид высевальных дисков; б) цилиндрический корпус

F i g. 3. Disk sowing unit with peripheral cells: a) general view of sowing discs; b) cylindrical body

Высевающий диск вращается внутри цилиндрического корпуса, на образующих которого напротив друга расположены друг высевальные отверстия для обеспечения плавного высева семян.

Недостатком данного аппарата являются повышенный уровень повреждения семян в результате их западания между высевальным диском и цилиндрическим корпусом.

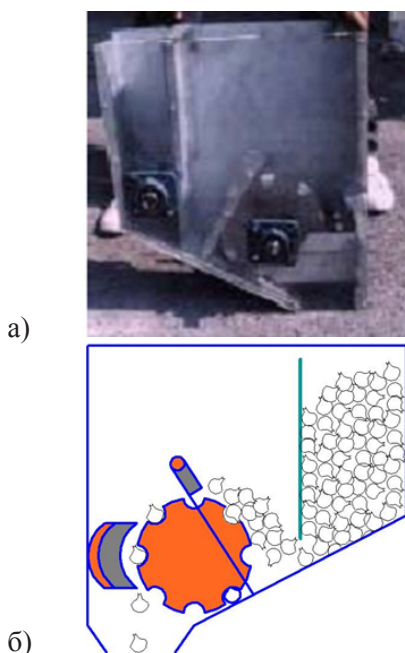
Также известен дисковый высевальный аппарат, рабочими элементами которого являются лопатки, диаметрально расположенные на диске [8], установленном в нижней части семенного ящика на валу (рис. 4).

За один оборот опорно-приводного колеса обеспечивается вынос одной луковицы из семенного ящика и укладка его в раскрытую сошником борозду, что позволяет повысить равномерность распределения луковиц в борозде. Кроме того, семенной ящик указанного высевального аппарата является сменным для каждого вида высаживаемой продукции и его формы и приводит к снижению повреждений семенного материала.



Р и с. 4. Дисковый высевальный аппарат с диаметрально расположенными лопатками
F i g. 4. Disk sowing unit with diametrically located blades

Также известна конструкция аппарата с дозирующей системой (рис. 5), выполненной в виде пакета установленных пластин и щеток, имеющих на своей поверхности треугольные канавки [9].



Р и с. 5. Дисковый высевной аппарат:
а) общий вид; б) технологическая схема

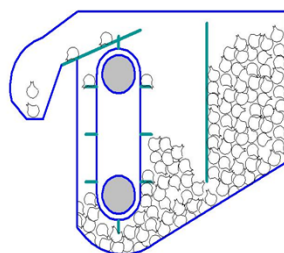
F i g. 5. Disc sowing unit:
a) general view; b) flow chart

Функциональное назначение пакета пластин и щеток заключается в поштучном дозировании семян в соответствии со схемой посева, а также удалении лишних семян с высаживающего барабана с целью предупреждения появления двойников при всходах.

Была разработана и исследована конструкция ленточного высаживающего аппарата (рис. 6).



а)



б)

Р и с. 6. Ленточный высевной аппарат:
а) общий вид; б) технологическая схема

F i g. 6. Belt sowing unit:
a) general view; b) flow chart

Разработка данного аппарата была вызвана необходимостью снижения повреждений посадочного материала в результате более «мягкого» (по сравнению с дисковым высевным аппаратом) режима работы и уменьшения взаимодействия со вспомогательными рабочими органами – пластинами и щетками.

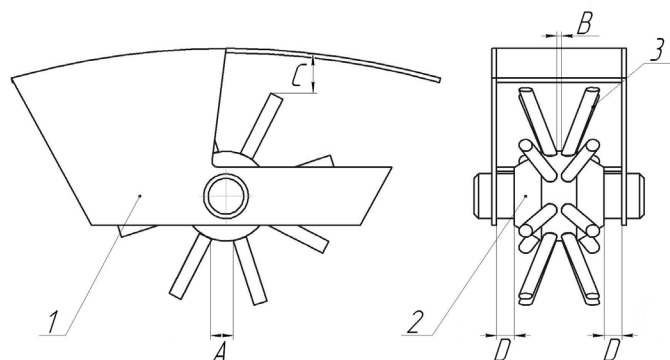
Анализ технических средств механизированной посадки лука-севка показал, что использование посадочных машин с механическими высевными аппаратами не обеспечивает соблюдение агротехнических требований по равномерности распределения луковиц вдоль ряда (данный показатель редко превышает 60 %), а также ориентированию луковиц в борозде вешкой вверх (наибольшее значение – 20 %).

Материалы и методы

Анализ современных конструкций высевных аппаратов показал, что к наиболее отрицательным факторам современных лукопосадочных машин следует отнести невозможность единичной подачи луковиц аппаратом, что приводит к нарушению агротехнических требований посадки луковиц.

Для ориентированной посадки луковиц был разработан катушечно-вилочный высаживающий аппарат [10].

Данный аппарат (рис. 7) состоит из корпуса 1 и установленной на валу катушки 2 с желобками, образованными



Р и с. 7. Схема катушечно-вилчатого высаживающего аппарата:

1 – корпус; 2 – катушка с желобками; 3 – стержень

F i g. 7. The scheme of forked-roller sowing unit:

1 – body; 2 – reel with grooves; 3 – kernel

ми вильчатыми захватами в виде стержней 3^2 .

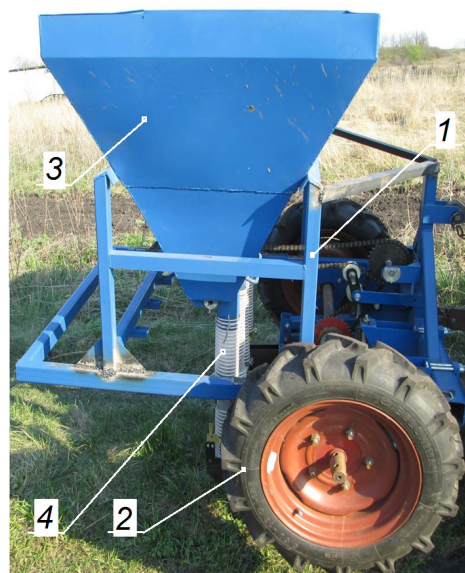
Катушка 2 размещена в корпусе 1, в боковых стенках которого выполнены прорезы таким образом, чтобы напротив прорезы располагался сектор катушки размером не менее 90° . При этом расстояние C между верхними концами стержней вильчатых захватов и крышкой корпуса больше минимального диаметра и меньше максимального диаметра высаживаемых луковиц, а расстояние D между торцами катушки и боковыми стенками корпуса меньше минимального диаметра высаживаемых луковиц.

Катушка предназначена для поштучной подачи луковиц в семяпровод. Вильчатые захваты катушки выполнены в виде стержней, расположенных под острым углом друг к другу, причем расстояние B между стержнями у основания меньше диаметра высаживаемых луковиц.

Расстояние A между вильчатыми захватами, измеренное по касательной, проведенной к основанию катушки 2, больше диаметра высаживаемых луковиц.

Данная конструкция позволяет осуществлять поштучный отбор и подачу

луковиц в семяпровод независимо от фракции высаживаемых луковиц.



Р и с. 8. Общий вид лукопосадочной машины, оснащенной катушечно-вилчатым высаживающим аппаратом (вид справа):

1 – рама; 2 – опорно-приводное колесо;
3 – бункер; 4 – семяпровод с сошником

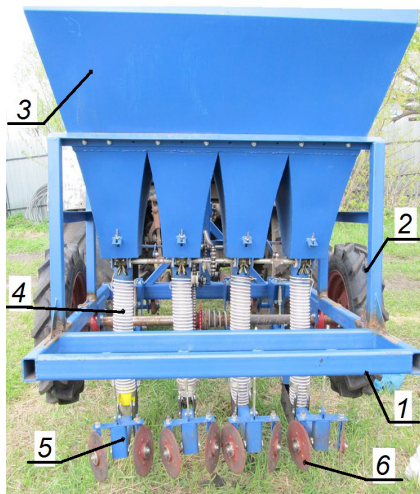
F i g. 8. The general view of onion sowing unit with a forked-roller sowing unit (right view):

1 – frame; 2 – support wheel;
3 – bunker; 4 – seed conductor with opener

² Пат. № 2544631 Российская Федерация. МПК A01 C11/02. Катушечно-вилчатый высаживающий аппарат для посадки луковичных культур / П. А. Емельянов, А. Г. Аксенов, В. А. Овтов, П. А. Сидоров. № 2544631 ; опубл. 01.07.2013. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24024946>

Для решения поставленных задач программа экспериментов включала полевые исследования опытного образца посадочной машины, оборудованного катушечно-вильчатым устройством.

Для проведения лабораторных исследований в полевых условиях фирмой ООО «Агроинженерия» (г. Пенза) была разработана и изготовлена посадочная машина, оснащенная катушечно-вильчатым высевальным устройством (рис. 8–9). Лукопосадочная машина включает в себя также раму 1, опорные колеса 2, которые служат приводом для высаживающего аппарата, бункер 3, семяпровод 4 с сошником 5 и заделывающие диски 6.



Р и с. 9. Общий вид лукопосадочной машины, оснащенной катушечно-вильчатым высаживающим аппаратом (вид сзади): 1 – рама; 2 – опорно-приводное колесо; 3 – бункер; 4 – семяпровод; 5 – сошник; 6 – заделывающий диск

Fig. 9. The general view of onion sowing unit with a forked-roller sowing unit (back view): 1 – frame; 2 – support wheel; 3 – bunker; 4 – seed conductor; 5 – opener; 6 – embedding disk

Результаты исследования

Исследования по определению оптимального значения скорости V_M машины для посадки луковиц проводились при неизменных высоте падения луковицы $H_A = 0,12$ м и частоте вращения высеваль-

ющего барабана $n_B = 0,47$ с⁻¹. Рабочую скорость посадочной машины меняли в интервале от 0,8 м/с до 1,2 м/с с шагом 0,1 м/с.

Полученные данные позволили построить графические зависимости доли луковиц, высаженных вешкой вверх (K , %), и равномерности посадки (P , %) от рабочей скорости лукопосадочной машины (рис. 10–11).

Уравнения регрессии доли луковиц, высаженных вешкой вверх (K , %), и равномерности посадки (P , %) от рабочей скорости лукопосадочной машины имеют следующий вид:

$$K = -65 + 235,8751 \cdot V_M - 121,4286 \cdot V_M^2,$$

$$P = 136,4 - 96,4286 \cdot V_M + 35,7143 \cdot V_M^2. \quad (5)$$

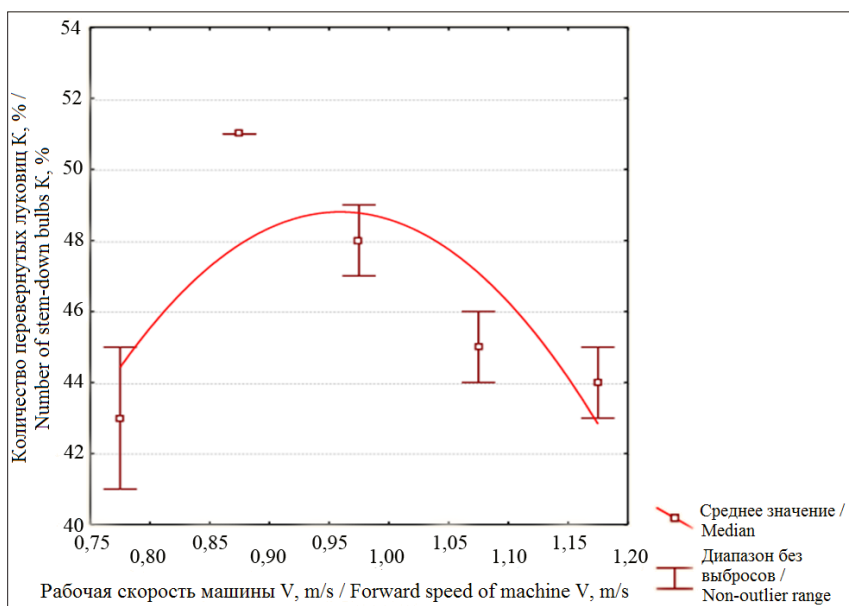
Анализ зависимостей, представленных на графиках (рис. 12–13), показал, что максимальная доля луковиц, расположенных вешкой вверх (51 %), соответствует рабочей скорости 0,9–1,0 м/с, а наибольшая равномерность посадки достигается при наименьшей рабочей скорости лукопосадочной машины.

Таким образом, качественные показатели посадки луковиц лука-севка при значении поступательной скорости V_M движения в интервале 0,9–1,0 м/с достигают следующих значений: $K = 51$ %, $P = 79$ %. Доля поврежденных луковиц не превышала 0,9 %.

Обсуждение и заключения

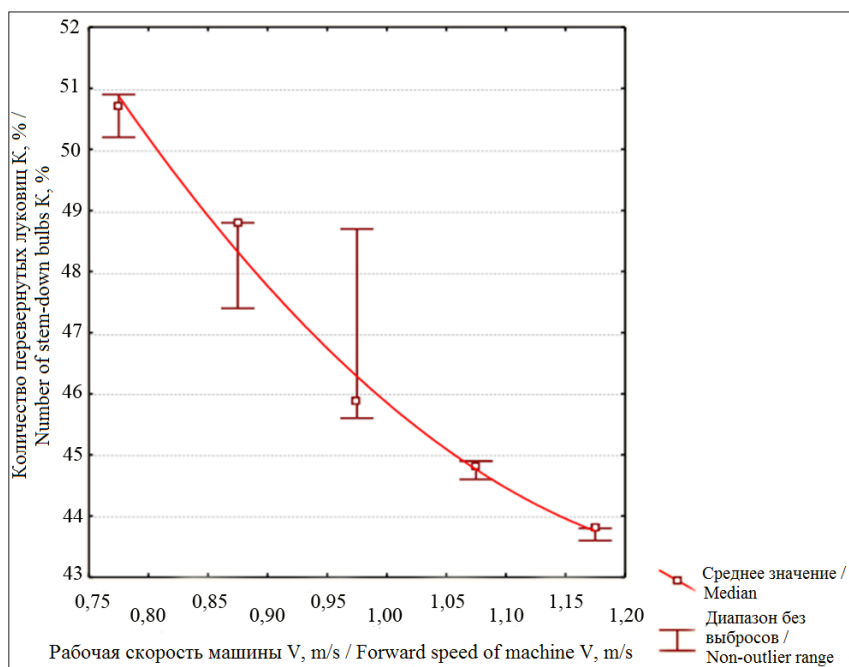
Проведенные исследования позволили обосновать, разработать и запатентовать конструкцию нового катушечно-вильчатого высаживающего аппарата для посадки луковиц вешкой вверх.

Для проверки эффективности внедрения опытного образца разработанного устройства были проведены его сравнительные испытания по общепринятой методике в условиях ООО «Новый урожай» Пензенской обл.-ти в процессе возделывания репчатого лука сорта «штутгартер ризен». Выбор ленточного высаживающего аппарата посадочной машины в качестве объекта сравнения



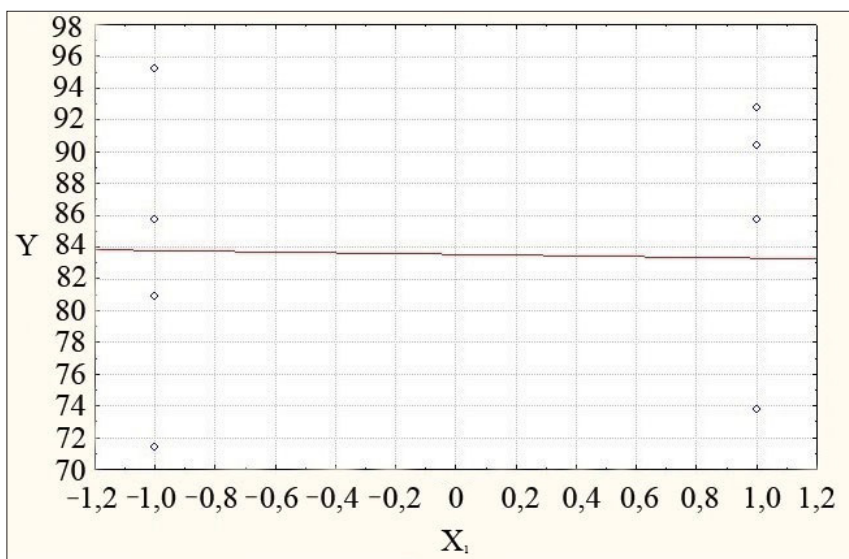
Р и с. 10. Влияние рабочей скорости лукопосадочной машины на долю луковиц, высаженных вешкой вверх

F i g. 10. The dependence of translational speed of onion sowing machine on number of bulbs planted by bottom down



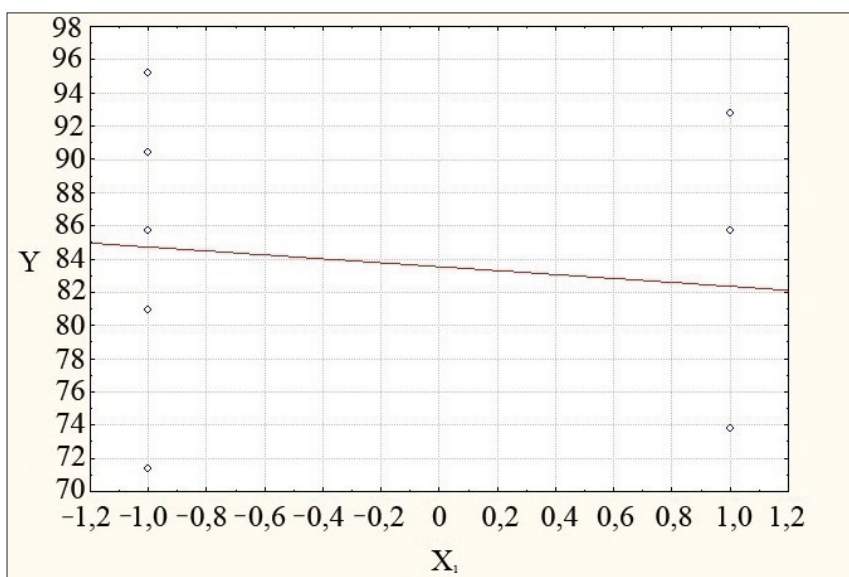
Р и с. 11. Влияние рабочей скорости лукопосадочной машины на равномерность посадки

F i g. 11. The dependence of translational speed of onion sowing machine on distribution of bulbs along the row



Р и с. 12. Графики рассеяния уровня фактора (поступательной скорости V_M движения) от количества луковиц, высаженных донцем вниз, при проведении полевых исследований лукопосадочной машины

F i g. 12. The factor dispersion scatters diagram of translational velocity V_M of motion of number of bulbs planted by bottom down during field testing of the onion sowing machine



Р и с. 13. Графики рассеяния уровня фактора (поступательной скорости V_M движения) от равномерности распределения луковиц, высаженных донцем вниз, при проведении полевых исследований лукопосадочной машины

F i g. 13. The factor dispersion scatters diagram of translational velocity V_M of motion with uniformity of distribution of bulbs planted by bottom down during field testing of the onion sowing machine



с катушечно-вильчатым высаживающим аппаратом обусловлен его более широкой распространенностью на производстве лука по сравнению с другими известными устройствами.

Применение катушечно-вильчатого высаживающего аппарата позволило увеличить урожайность лука-репки до 283 ц/га, что в 1,25 раза превышает показатели ленточного аппарата за счет повышения доли луковиц высаженных

донцем вниз на 20 %, а равномерности посадки луковиц – на 19 %.

Таким образом, равномерность посадки составила 79 %; процент луковиц вешкой вверх – 51 %, на бок – 47 %, вешкой вниз – 2 % при рабочей скорости лукопосадочной машины $V_M = 0,9-1,0$ м/с, высоте падения луковицы $H_A = 0,12$ м и частоте вращения высаживающего барабана $n_B = 0,47$ с⁻¹.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. The performance of agricultural science and technology transformation fund of different technical fields / Sh. Qiang [et al.] // International Conference on Engineering Management, Engineering Education and Information Technology. 2015. Vol. 3. P. 94–98. URL: <https://www.atlantispress.com/proceedings/emeeit-15/25841879>
2. «Лук-коллективист» благодарит сеятеля / Н. П. Ларюшин [и др.] // Сельский механизатор. 2000. № 11. С. 18. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24838439>
3. **Brewster J. L.** Onions and other vegetable alliums. – 2nd ed. CABI, 2008. 432 p. URL: <http://en.booksee.org/book/1302658>
4. **Аксенов А. Г., Сибирёв А. В., Емельянов П. А.** Обеспеченность техникой для овощеводства // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 8. С. 25–30.
5. Onion seed production in California / R. E. Voss [et al.] // University of California Agriculture and Natural. 2013. Vol. 4. P. 1–8. URL: <http://anrcatalog.ucanr.edu/pdf/8008.pdf>
6. **Jadhav N. N., Aher H. R., Ghode A. P.** Design and fabrication of onion seed sowing machine // International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Automobile Engineering. 2015. Vol. 2. P. 1–10. URL: <http://www.ijrmee.org/download/design-and-fabrication-of-onion-seed-sowing-machine-1433826027.pdf>
7. A review on multi-seed sowing machine / A. B. Rohokale [et al.] // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2014. Vol. 5. P. 180–186. URL: <http://www.iaeme.com/MasterAdmin/UploadFolder/30120140502020/30120140502020.pdf>
8. Design and fabrication of seed sowing machine / S. V. Thorat [et al.] // International Research Journal of Engineering and Technology. 2017. Vol. 4. P. 704–707. URL: <https://www.irjet.net/archives/V4/i9/IRJET-V4I9122.pdf>
9. **Yenpayub J., Kingthong S., Benjaphragairat J.** Design and development of a garlic planter in Thailand // Bachelor's Thesis King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. 2002. Vol. 2. P. 1–10. URL: <http://fme.hcmuaf.edu.vn/data/design%20and%20development%20of%20a%20garlic%20planter%20in%20thailand.pdf>
10. Катушечно-вильчатый высаживающий аппарат / А. Г. Аксенов [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2015. № 5. С. 20–24. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24340648>

Поступила 18.10.2017; принята к публикации 19.12.2017; опубликована онлайн 20.03.2018

Об авторах:

Аксенов Александр Геннадьевич, заведующий отделом технологий и машин в овощеводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, ResearcherID: V-5572-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9546-7695>, 1053vim@mail.ru

Емельянов Павел Александрович, профессор кафедры основ конструирования механизмов и машин, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет» (440014, Россия, г. Пенза, ул. Ботаническая, д. 30), доктор технических наук, ResearcherID: V-6460-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5103-3289>, emelianov@mail.ru

Сибирёв Алексей Викторович, старший научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, ResearcherID: M-6230-2016, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9442-2276>, sibirev2011@yandex.ru

Вклад соавторов:

А. Г. Аксенов: научное руководство, формулирование основной концепции исследования, подготовка начального варианта текста и формирование выводов; П. А. Емельянов: проведение критического анализа исследования и доработка текста; А. В. Сибирёв: литературный и патентный анализ, участие в теоретическом исследовании, верстка и редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Qiang S., Li-Li X., Jun-Qiang W., Wei-Min Y. The performance of agricultural science and technology transformation fund of different technical fields. International Conference on Engineering Management, Engineering Education and Information Technology. 2015; 3:94–98. Available at: <https://www.atlantispress.com/proceedings/emeeit-15/25841879>
2. Laryushin N. P., Kukhmazov K. Z., Kukharev O. N., Yurtayev S. Ye. [“Onion-collectivist” thanks the seditor]. *Selskiy mekhanizator* = Rural Mechanic. 2000; 11:18. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24838439> (In Russ.)
3. Brewster J. L. Onions and other vegetable alliums. 2nd ed. CABI, 2008. Available at: <http://en.booksee.org/book/1302658>
4. Aksekov A. G., Sibirev A. V., Emelyanov P. A. The current state of onion production in Russia and the prospective of its development. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2016; 8:25–30. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=26192566> (In Russ.)
5. Voss R. E., Murray M., Bradford K., Mayberry K. S., Miller I. Onion seed production in California. University of California Agriculture and Natural. 2013; 4:1–8. Available at: <http://anrcatalog.ucanr.edu/pdf/8008.pdf>
6. Jadhav N. N., Aher H. R., Ghode A. P. Design and fabrication of onion seed sowing machine. International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Automobile Engineering. 2015; 2:1–10. Available at: <http://www.ijrmee.org/download/design-and-fabrication-of-onion-seed-sowing-machine-1433826027.pdf>
7. Rohokale A. B., Shewale P. D., Pokharkar S. B., Sanap K. K. A review on multi-seed sowing machine. International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2014; 5:180–186. Available at: <http://www.iaeme.com/MasterAdmin/UploadFolder/30120140502020/30120140502020.pdf>
8. Swapnil T., Kasturi M. L., Girish P., Rajkumar P. Design and fabrication of seed sowing machine. International Research Journal of Engineering and Technology. 2017; 4:704–707. Available at: <https://www.irjet.net/archives/V4/i9/IRJET-V4I9122.pdf>
9. Yenpayub J., Kingthong S., Benjaphragairat J. Design and development of a garlic planter in Thailand. Bachelor’s thesis King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang. 2002; 2:1–10. URL: <http://fme.hcmuaf.edu.vn/data/design%20and%20development%20of%20a%20garlic%20planter%20in%20thailand.pdf>



10. Aksenov A. G., Emelyanov P. A., Ovtov V. A., Sibirev A. V. Forked-roller feed mechanism for seed onion oriented planting. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machines and Technologies. 2015; 5:20–24. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=24340648> (In Russ.)

Submitted 18.10.2017; revised 19.12.2017; published online 20.03.2018

About the authors:

Aleksandr G. Aksenov, Head of Chair of Technology and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5^{1st} Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: V-5572-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9546-7695>, 1053vim@mail.ru

Pavel A. Emelyanov, Professor, Chair of Basic Designing Mechanisms and Machines, Penza State Agrarian University (30 Botanicheskaya St., Penza 440014, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: V-6460-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5103-3289>, emelianov@mail.ru

Alexey V. Sibirev, Senior Researcher, Chair of Technology and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5^{1st} Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: M-6230-2016, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9442-2276>, sibirev2011@yandex.ru

Contribution of co-authors:

A. G. Aksenov: scientific leadership, formulating of the basic research concept, writing the draft and the formation of conclusions; P. A. Emelyanov: critical analysis of research and finalizing the text; A. V. Sibirev: literary and patent analysis, participation in theoretical research, layout and editing of the text.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.



Очистка питьевой воды от фторидов методом обратного осмоса

**А. А. Шабарин*, В. Н. Водяков, А. В. Котин,
О. А. Кувшинова, Ю. И. Матюшкина**

ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

**shab_aa@mail.ru*

Введение. Одной из важнейших задач в сфере санитарно-эпидемиологического благополучия населения Российской Федерации является обеспечение его доброкачественной питьевой водой, безопасной в эпидемиологическом отношении и безвредной по химическому составу. Одной из главных задач водоочистки является регулирование содержания фторид-ионов в питьевой воде. Цель настоящей работы – изучение возможности очистки водопроводной воды от ионов фтора методом обратного осмоса.

Материалы и методы. Для удаления фторид-ионов была использована установка Alfa Laval PilotUnit 2.5" RO/NF с комплектом мембранных элементов спирального типа RO99-2517/48. Контроль за содержанием фторид-ионов проводили потенциометрическим методом с использованием рН-метра/милливольтметра Hanna HI 2211. В качестве индикаторного электрода использовали фторид-селективный электрод марки ЭЛИС 131 F, в качестве электрода сравнения – стандартный хлоридсеребряный электрод марки ЭВЛ-1МЗ. Градуировочные и буферные растворы изготавливали из реактивов марки х.ч. и ч.д.а., согласно ГОСТ 4386-89.

Результаты исследования. При однократном пропускании воды через обратноосмотическую мембрану содержание фторид-ионов сократилось с $2,29 \pm 0,02$ мг/л до $0,240 \pm 0,015$ мг/л; при двукратном – еще в 2 раза. По мере возрастания содержания фторид-ионов в ретентате наблюдалось некоторое увеличение концентрации F^- и в фильтрате. После очистки воды, содержащей 20 мг/л ионов фтора, его концентрация в фильтрате не превышала 0,5 мг/л.

Обсуждение и заключения. Использование установки Alfa Laval PilotUnit 2.5" RO/NF с комплектом мембранных элементов спирального типа RO99-2517/48 позволяет эффективно очищать водопроводную воду от ионов фтора до уровня ниже предельно допустимой концентрации. Данное исследование открывает перспективу применения обратного осмоса для очистки водопроводной воды с высоким содержанием фторид-ионов.

Ключевые слова: водопроводная вода, ионы фтора, фториды, обратный осмос, потенциометрический анализ

Для цитирования: Очистка питьевой воды от фторидов методом обратного осмоса / А. А. Шабарин [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 1. С. 36–47. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.036-047



Purification of Drinking Water from Fluorides by Reverse Osmosis

A. A. Shabarin*, V. N. Vodyakov, A. V. Kotin,
O. A. Kuvshinova, Y. I. Matushkina

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

*shab_aa@mail.ru

Introduction. An important task in the sphere of sanitary and epidemiological welfare of the population of the Russian Federation is provision of drinking water. Tap water must not contain pathogenic bacteria and dangerous chemicals. Purification systems regulate the concentration of fluoride ions in drinking water. The aim of this paper is to study the possibility of purifying tap water from fluoride ions by reverse osmosis.

Materials and Methods. We used the Alfa Laval PilotUnit 2.5 "RO/NF with a set of spiral-type membrane elements RO99-2517/48 to remove fluoride ions. We measured the concentration of fluoride ions by the potentiometric method using the Hanna HI 2211 (pH/mV/T). Fluoride-selective electrode ELIS 131 F was used as an indicator electrode and the standard chloride-silver electrode EVL-1M3 was used as a reference electrode. Both the calibration and buffer solutions were prepared from chemically pure reagents and A. R. purity for analysis reagents according to GOST 4386-89.

Results. A single passage of water through the reverse osmosis membrane reduced the concentration of fluoride ions from 2.29 ± 0.02 to 0.240 ± 0.015 mg/l. Double passage of water reduced the concentration by a factor of two. As the concentration of fluoride ions increased in the retentate, the concentration in the filtrate slightly increased too. Purification of water reduced the concentration of fluoride ions from 20 mg/l, to 0.5 mg/l.

Discussion and Conclusions. Thus, using the Alfa Laval PilotUnit 2.5" RO/NF with a set of spiral-type membrane elements RO99-2517/48 filters tap water of ions of fluoride to the maximum allowable concentration. This study opens the perspective of using reverse osmosis to purify tap water with high concentration of fluoride ions.

Keywords: tap water, fluoride ions, fluorides, reverse osmosis, potentiometric analysis

For citation: Shabarin A. A., Vodyakov V. N., Kotin A. V., Kuvshinova O. A., Matushkina Y. I. Purification of Drinking Water from Fluorides by Reverse Osmosis. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(1):36–47. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.036-047

Введение

Одной из важнейших задач в сфере санитарно-эпидемиологического благополучия населения Российской Федерации является обеспечение его доброкачественной питьевой водой, безопасной в эпидемиологическом отношении и безвредной по химическому составу [1]. Одной из главных проблем водоочистки является регулирование содержания фторид-ионов в питьевой воде. Фтор относится к микроэлементам, содержание которых в воде для нормальной жизнедеятельности человека должно находиться в строго определенных пределах [2].

Длительное употребление населением воды с концентрацией фтора ниже 0,7 мг/л способствует в совокупности с другими факторами повышенной заболеваемости кариесом. Использование воды с концентрацией фтора, превышающей 1,5 мг/л, вызывает флюороз. Именно поэтому в РФ и других странах нормативные документы, в частности СанПиН¹, регламентируют содержание фтора в питьевой воде от 0,7 до 1,5 мг/л, в зависимости от климатической зоны. На территории РФ большинство природных вод, используемых для водообеспечения, содержат

¹ СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества (взамен СанПиН 2.1.4.559-96). URL: <http://docs.cntd.ru/document/901798042>

либо повышенные, либо пониженные концентрации фтора. При этом фторирование или дефторирование воды применяется очень редко из-за высокой стоимости традиционных технологий.

Цель настоящей работы – изучение эффективности очистки водопроводной воды от ионов фтора методом обратного осмоса.

Обзор литературы

Фтор относится к наиболее распространенным загрязнителям, оказывающим токсикологическое влияние на организм человека. При поражении выделительной системы гиперфтороз находит свое выражение в первую очередь в поражении почек как у детей, так и у взрослых, а также в накоплении фтора в биосубстратах (моча, волосы)² [3]. Известно, что фтор и его производные токсичны, причем даже в большей степени, чем свинец [4–6]. В перечень государств, где действует запрет на фторирование воды, входят Япония, Индия, Китай, Израиль и многие страны Европейского союза.

Влияние фтора на органы и системы организма человека обусловлено рядом биохимических реакций [7–8]. Ион фтора способен образовывать соединения с углеродом и водородом, вызывая разрушение живой клетки. Токсическое действие фторидов обусловлено тем, что они легко проникают через мембраны клеток, оказывают угнетающее действие на ферменты и приводят к токсико-метаболическим нарушениям, в т. ч. у детей разного возраста [9–11].

Ряд авторов отмечает, что фтористые соединения провоцируют про-

цессы сенсibilизации в организме [12–14], подавляют клеточный и гуморальный иммунитет, фагоцитоз, меняют основные нервные процессы, вегетативный тонус, при длительном действии вызывают задержку нервно-психического развития [15], синдром нарушения внимания с гиперреактивностью и эмоциональные расстройства³ [16–18].

В настоящее время высокая степень очистки промышленных сточных вод от ионов фтора может быть достигнута только при использовании энергозатратного, дорогостоящего импортного водоочистного оборудования, что снижает технико-экономические показатели работы предприятий в десятки раз⁴⁻⁵ [19–21].

Очевидно, целесообразно применять такие технологии, которые позволяют возвращать очищенную воду в производственный цикл, извлекать фторид-ионы и использовать содержащиеся их соединения в качестве вторичного сырья, а также применять в процессе очистки экономически доступные методы и материалы.

Методы, обеспечивающие извлечение ионов фтора из воды поверхностных и подземных источников, можно разделить на 4 группы: осаждение и соосаждение; сорбционные; ионообменные и физико-электрохимические [22–24]. В последнюю группу входят электрокоагуляция и мембранные методы: электродиализ, нанофильтрация и обратный осмос.

Такое деление довольно условно, поскольку один и тот же механизм извлечения фтора, а также реагенты, от-

² Аникин В. В., Долгачева Т. А. Причинная связь содержания фтора в питьевых водах Мордовии и заболеваемости населения (болезнями выделительной системы) // XLIV Огарёвские чтения : мат-лы науч. конф. Саранск : Изд-во Морд. ун-та, 2016. С. 495–500. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26380457>

³ Авцын А. П., Жаворонков А. А. Патология флюороза. Новосибирск : Наука, 1981. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001069867>

⁴ Чуркин Р. А. Разработка технологии очистки сточных вод от фторид-ионов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2011. 20 с. URL: <http://www.dissercat.com/content/razrabotka-tehnologii-ochistki-stochnykh-vod-ot-florid-ionov>

⁵ Смирнова Е. Е. Технология очистки сточных вод от токсичных соединений фтора : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. СПб. : СЗГЗТУ, 2006. 23 с. URL: <http://www.dissercat.com/content/tehnologiya-ochistki-stochnykh-vod-ot-toksichnykh-soedinenii-flora>



ответственные за данный процесс, могут отнестись к разным методам [25].

Метод осаждения (коагуляции), обеспечивающий извлечение фтора свежесформированными осадками гидроксидов магния, алюминия, железа и фосфата кальция, экономически выгодно использовать для поверхностных вод, осветляемых перед подачей в сеть, хотя в некоторых случаях его применяют и для подземных вод.

С развитием технологий получения высокоэффективных коагулянтов полиоксисульфатов и полиоксихлоридов алюминия стало возможным использование их в качестве реагентов в процессах обесфторивания. При этом снижается расход не только коагулянта (в среднем на 25–30 %) по сравнению с сульфатом алюминия, но и щелочных реагентов (извести, соды), а также улучшается процесс седиментации и отстаивания. Установлена эффективная сорбция ионов фтора матрицей активного гидроксида алюминия, формирующегося в процессе гидролиза полигидроксосолей алюминия, вследствие соразмерности ионов F^- и OH^- [21].

Использование методов осаждения и соосаждения при обесфторивании воды обуславливает необходимость фильтрования через различные сорбенты. Широкое применение получили следующие материалы: активированный оксид алюминия, фосфатсодержащие, глинистые и почвенные, магнетиальные сорбенты, активированный уголь и др. [26].

Известно, что анионообменные смолы различной основности, поверхность которых насыщена OH^- или анионами, способны удалять из воды ионы фтора [23]. Наибольшая емкость присуща анионитам, содержащим четвертичную аминогруппу. В начале процесса фильтрования через анионитовый фильтр практически все ионы фтора задерживаются загрузкой, поэтому до 1,2 мг $F^-/л$

фильтрат разбавляют исходной водой. Повышение содержания фтора в фильтрате до уровня, превышающего предельно допустимую концентрацию (ПДК) (1,5 мг/л), свидетельствует об окончании цикла. Смола отмывают пересыщенным раствором хлорида натрия или соляной кислотой.

Несмотря на 90–95%-ное удаление фтора, метод характеризуют высокая себестоимость процесса из-за стоимости материала, его предобработки, регенерации, необходимости утилизации обогащенных фтором отходов; снижение эффективности очистки в присутствии конкурентноспособных анионов; низкий pH очищенной воды и загрязнение ее хлорид-ионами.

Электрокоагуляционное обесфторивание позволяет удалять фторид-ионы без применения химических реагентов, вместе с которыми в воду поступает значительное количество дополнительных солей, благодаря формированию высокоактивного гидроксида алюминия вследствие анодного растворения алюминиевых и дюралюминиевых электродов [22]. Для снижения энергозатрат варьируют токовую нагрузку и расстояние между электродами, а электролиз ведут при постоянном или переменном токе.

Положительными моментами применения электрокоагуляции при обесфторивании являются простота технологической схемы; отсутствие складских помещений, реагентов и аппаратуры для их приготовления (либо регенерации); довольно высокий эффект очистки. Основные недостатки данного метода – значительный расход электроэнергии и металлического алюминия, быстрая пассивация электродов.

В 2000–2010-е гг. широкое применение в различных отраслях промышленности нашли мембранные процессы: электродиализ, ультрафильтрация, нанофильтрация и обратный осмос⁶ [27].

⁶ **Мулдер М.** Введение в мембранную технологию. М. : Мир, 1999. 513 с. URL: <http://booksshare.net/index.php?id1=4&category=biol&author=mulder-m&book=1999>

Наночислительные мембраны, которые характеризуются относительно невысокой задерживающей способностью по отношению к одновалентным ионам, могут успешно применяться для очистки воды от ионов фтора, эффективно снижая их количество, но при этом не задерживая полностью [23].

Для очистки жесткой грунтовой воды с повышенным содержанием ионов железа(II), стронция, нитратов, фторидов технология обратного осмоса наиболее выгодна по сравнению с другими, поскольку обеспечивает высокую эффективность очистки от ионо- и молекулярно-растворенных примесей. Основными факторами, влияющими на процесс обесфторивания воды методом обратного осмоса, являются ее химический состав (в частности, исходная концентрация F^-), расход, pH, давление, температура и др.⁷

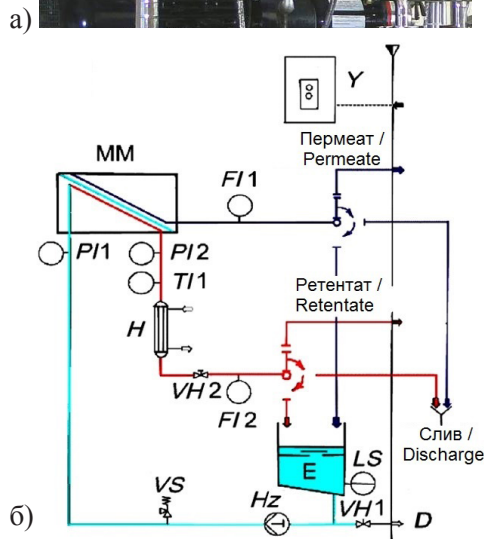
Некоторые исследователи [23; 27] отмечают следующие положительные моменты использования процесса обратного осмоса при водоподготовке: высокая эффективность удаления не только ионов фтора, но и различных неорганических и органических веществ, пестицидов, микроорганизмов; одновременная очистка и дезинфекция воды; отсутствие химических реагентов; работа в широком диапазоне pH; гарантированное постоянное качество воды; осуществление процесса в простом и автоматизированном операционном режимах с использованием компактной модульной системы при минимальных трудовых ресурсах; высокий ресурс мембран.

Таким образом, применение обратного осмоса в качестве метода обесфторивания воды является актуальным.

Материалы и методы

Отработка технологии мембранного обесфторивания питьевой воды проводилась на пилотной установке Alfa Laval PilotUnit 2.5" RO/NF (рис. 1)

с комплектом мембранных элементов спирального типа RO99-2517/48.



Р и с. 1. Общий вид (а) и принципиальная схема (б) лабораторной установки PilotUnit 2.5" RO/NF: D – поток в канализацию; E – резервуар; F1, F2 – ротаметры; G – подвод/отвод теплоносителя; H – теплообменник; Hz – насос циркуляционный; Y – подача электропитания; LS – датчик уровня; MM – мембранный модуль; PI1–2 – манометры; TI1 – термометр; VH1, VH2 – запорно-регулирующая арматура; VS – клапан предохранительный

Fig. 1. The general view (a) and schematic diagram (b) of the laboratory installation PilotUnit 2.5" RO/NF: D – flow in the sewer; E – tank; F1–2 – rotameters; G – supply/discharge of coolant; H – heat exchanger; Hz – circulation pump; Y – power supply; LS – sensor level; MM – membrane module; PI1–2 – pressure gauges; TI1 – thermometer; VH1–2 – shut-off and control valves; VS – safety valve

⁷ URL: <http://booksshare.net/index.php?id1=4&category=biol&author=mulder-m&book=1999>



Полимерные обратноосмотические (из эфиров целлюлозы) мембранные модули спирального типа с площадью фильтрации 1 м² по данным изготовителя обеспечивают производительность до 500 л/ч.

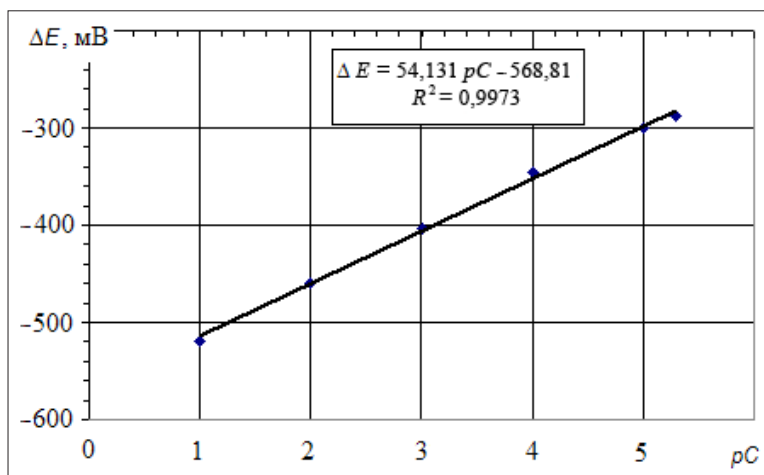
Получение обесфторенной воды на установке PilotUnit 2.5" производилась в следующей последовательности.

1. После монтажа мембранного элемента спирального типа RO99-2517/48 в мембранный модуль *ММ* в резервуар *Е* установки заливалось 14 л водопроводной воды, которая при комнатной температуре подвергалась циркуляции по замкнутому контуру в течение 2–3 мин. После этого с помощью дросселя *VH2* устанавливался расход ретентата 13,4 л/мин (по ротаметру *FI2*). При этом давление ретентата составляло 40 бар (по манометру *PI2*), а расход пермеата – 0,42 л/мин (по ротаметру *FI1*). Циркуляция через мембрану под давлением продолжалась 20–25 мин. Каждые 5 мин проводилось измерение жесткости ретентата и фильтрата кондуктометром TDS-3. Затем насос отключался, отработанная вода сливалась в канализацию.

Согласно ГОСТ 4386-89⁸, содержание фторид-ионов в питьевой воде необходимо определять фотометрическим и потенциометрическим методами. Применение второго метода более предпочтительно, поскольку он позволяет достаточно точно определить концентрацию фторид-ионов в широком диапазоне. Кроме того, применение потенциометрического метода ограничивающих растворов позволяет значительно увеличить экспрессность и улучшить воспроизводимость и правильность анализа [28].

Потенциометрическое определение фторид-ионов проводили на pH-метре/милливольтметре Hanna HI 2211. В качестве индикаторного электрода использовали фторид-селективный электрод марки ЭЛИС 131 F, в качестве электрода сравнения – стандартный хлоридсеребряный электрод марки ЭВЛ-1МЗ. Градуировочные и буферные растворы изготавливали из реактивов марки х.ч. и ч.д.а., согласно ГОСТ 4386-89⁸.

Из рис. 2 видно, что определение фторид-ионов возможно до $5 \cdot 10^{-6}$ моль/л, или 0,095 мг/л.



Р и с. 2. Зависимость изменения потенциала фторид-селективного электрода от *pC* фторида натрия

F i g. 2. The dependence of change in the potential of fluoride-selective electrode on *pC* of sodium fluoride

⁸ ГОСТ 4386-89. Вода питьевая. Методы определения массовой концентрации фторидов. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-4386-89>

Потенциометрическое определение фторид-ионов в образцах воды проводили методом ограничивающих растворов. При этом сначала измеряли разность потенциалов электродов в растворе фторида натрия с концентрацией 10^{-5} моль/л – $pC = 5$ (E_n), исследуемой воде – lgC_x (E_x) и растворе фторида натрия с концентрацией 10^{-4} моль/л – $pC = 4$ (E_e). В градуировочные растворы и исследуемую воду добавляли буферный раствор с $pH = 5,5$. Концентрацию фторид-ионов с учетом разбавления буферным раствором рассчитывали по формуле:

$$lgC_x = (E_x - E_e) (pC_e - pC_n) / (E_n - E_e) - pC_e,$$

затем полученную молярную концентрацию пересчитывали на мг/л F^- :

$$m = C_x \cdot 19 \cdot 1\,000,$$

где C_x – молярная концентрация фторид ионов, моль/л; 19 – молярная масса фторид ионов, г/моль; 1 000 – пересчетный множитель.

Результаты исследования

Очистку водопроводной воды (поступающей из артезианского источника, расположенного в пос. Ялга Республики Мордовия) от ионов фтора проводили на установке, представленной на рис. 1.

Установлено, что при однократном пропускании воды через мембранный элемент RO99-2517/48 содержание фторид-ионов сократилось с $2,29 \pm 0,02$ мг/л до $0,240 \pm 0,015$ мг/л. После двукратной очистки – еще почти в 2 раза (табл. 1). Для подтверждения результатов эксперимента в пропущенную через мембрану воду вводили фторид натрия в интервале концентраций 5–20 мг/л. По мере возрастания содержания фторид-ионов в исследуемой воде наблюдалось некоторое увеличение концентрации F^- в фильтрате. После очистки воды, содержащей 20 мг/л ионов фтора, его концентрация не превышала 0,5 мг/л (таблица).

Т а б л и ц а

Table

Результаты определения фторид-ионов в образцах воды ($n = 5$; $P = 0,95$)

The results of measuring fluoride ions in water samples ($n = 5$; $P = 0.95$)

№ п/п	Объект исследования / Object of study	Найдено F^- , мг/л / Found F^- , mg/l	S_r
1	2	3	4
1	Исходная вода из водопровода / Initial tap water	$2,290 \pm 0,020$	0,008
2	Полученный пермеат (вода после мембранной фильтрации) / The resulting permeate (water after membrane filtration)	$0,240 \pm 0,015$	0,050
3	Двукратный пропуск водопроводной воды через мембранный элемент / Double pass of tap water through a membrane element	$0,130 \pm 0,010$	0,070
4	Введение в пермеат 5 мг/л F^- / Introduction of 5 mg/l F^- to permeate	$5,210 \pm 0,110$	0,016
5	Пермеат с 5 мг/л F^- , после мембранной фильтрации / Permeate with 5 mg/l F^- , after membrane filtration	$0,180 \pm 0,012$	0,070
6	Введение в пермеат 10 мг/л F^- / Introduction of 10 mg/l F^- to permeate	$10,250 \pm 0,200$	0,016
7	Пермеат с 10 мг/л F^- , после мембранной фильтрации / Permeate with 10 mg/l F^- , after membrane filtration	$0,340 \pm 0,018$	0,040
8	Введение в пермеат 15 мг/л F^- / Introduction of 15 mg/l F^- to permeate	$15,300 \pm 0,180$	0,009



1	2	3	4
9	Пермеат с 15 мг/л F^- , после мембранной фильтрации / Permeate with 15 mg/l F^- , after membrane filtration	0,360 ± 0,019	0,040
10	Введение в пермеат 20 мг/л F^- / Introduction of 20 mg/l F^- to permeate	20,300 ± 0,260	0,010
11	Пермеат с 20 мг/л F^- , после мембранной фильтрации / Permeate with 20 mg/l F^- , after membrane filtration	0,470 ± 0,023	0,040

Обсуждение и заключения

Таким образом, использование установки Alfa Laval PilotUnit 2.5" RO/NF с комплектом мембранных элементов спирального типа RO99-2517/48 позволяет эффективно очищать водопроводную воду от ионов

фтора до уровня ниже ПДК. Данное исследование открывает перспективу применения обратного осмоса для получения высококачественной питьевой воды из артезианских источников с высоким содержанием фторид-ионов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Горяев Д. В., Тихонова И. В., Торотенкова Н. Н. Гигиеническая оценка качества питьевой воды и риски для здоровья населения Красноярского края // Анализ риска здоровью. 2016. № 3. С. 35–43. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27557647>
2. Сатыго Е. А., Данилов Е. О. Оценка содержания фтора в воде для планирования эндогенной профилактики кариеса зубов // Стоматология детского возраста и профилактика. 2011. Т. 10, № 2. С. 64–66. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16753215>
3. Developmental fluoride neurotoxicity: a systematic review and meta-analysis / A. L. Choi [et al.] // Environmental Health Perspectives. 2012. Vol. 120, no. 10. P. 1362–1368. URL: <https://www.pubfacts.com/detail/22820538/Developmental-fluoride-neurotoxicity-a-systematic-review-and-meta-analysis>
4. High prevalence of dental fluorosis among adolescents is a growing concern: a school based cross-sectional study from Southern India / A. Verma [et al.] // Environmental Health and Preventive Medicine. 2017. Vol. 22, no. 1. DOI: 10.1186/s12199-017-0624-9
5. Fluoride exposure and indicators of thyroid functioning in the Canadian population: implications for community water fluoridation / A. M. Barberio [et al.] // Journal of Epidemiology and Community Health. 2017. Vol. 71, no. 10. P. 1019–1025. DOI: 10.1136/jech-2017-209129
6. Савченков М. Ф. Гигиеническая оценка воды с различным содержанием фтора // Сибирский медицинский журнал. 2008. Т. 77, № 2. С. 65–67. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21481665>
7. Фесенко М. Е., Комар В. Н., Стасюк А. И. Состояние нервно-психического развития детей, употребляющих питьевую воду с повышенным содержанием фтора // Здоровье ребенка. 2011. № 8. С. 58–60. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/sostoyanie-nervno-psihicheskogo-razvitiya-detey-upotreblayuschih-pitievuyu-vodu-s-povyshennym-soderzhaniem-ftora>
8. Экспериментальные исследования механизмов иммунной защиты в динамике фтористой интоксикации / Т. К. Ядыкина [и др.] // Медицинская иммунология. 2015. Т. 17, № 5. С. 81–89. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24499030>
9. Оценка воздействия фтора на детское население Иркутской области / Н. В. Ефимова [и др.] // Медицина труда и промышленная экология. 2009. № 1. С. 23–26. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12448685>
10. Патология щитовидной железы у детского населения при сочетанном воздействии дефицита йода и фтористого загрязнения окружающей среды / М. Ф. Савченков [и др.] // Гигиена и санитария. 2016. Т. 95, № 12. С. 1201–1205. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28089949>
11. Ayoob S., Gupta A. K. Fluoride in drinking water: a review on the status and stress effects // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2006. Vol. 36, no. 6. P. 433–487. DOI: 10.1080/10643380600678112

12. Хроническая фтористая интоксикация как фактор риска развития атеросклероза / О. Ю. Коротенько [и др.] // Гигиена и санитария. 2015. Т. 94, № 5. С. 91–94. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23936452>
13. Нарушения в системе гемостаза у рабочих с профессиональным флюорозом как фактор риска ишемической болезни сердца / С. Н. Филимонов [и др.] // Медицина труда и промышленная экология. 2005. № 4. С. 35–38. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17644429>
14. **Narsimha A., Sudarshan V.** Contamination of fluoride in groundwater and its effect on human health: a case study in hard rock aquifers of Siddipet, Telangana State, India // Applied Water Science. 2017. Vol. 7, no. 5. P. 2501–2512. DOI: 10.1007/s13201-016-0441-0
15. **Ullah R., Zafar M. S., Shahani N.** Potential fluoride toxicity from oral medicaments: a review. 2017. Vol. 20, no. 8. P. 841–848. DOI: 10.22038/IJBMS.2017.9104
16. **Dos Santos C. C., Santos E. L., Goncalves F.** Evaluation of contaminants in fluorosilicic acid used for public water fluoridation in the Santos region, Brazil // Water Science and Technology-Water Supply. 2017. Vol. 17, no. 4. P. 921–928. DOI: 10.2166/ws.2016.191
17. **Алексеев Л. С., Ивлева Г. А., Аль-Амри З.** Техничко-гигиенические аспекты фторирования питьевой воды // Вестник МГСУ. 2012. № 3. С. 154–158. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17965319>
18. Токсическое действие фторида натрия при экспериментальном флюорозе / Е. В. Уланова [и др.] // Acta Biomedica Scientifica. 2009. № 1. С. 275–277. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13010334>
19. **Прончева Л. Е., Чудновский С. М.** Новая технология регулирования содержания фтора в питьевой воде // Современные наукоемкие технологии. 2004. № 1. С. 64–65. URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=21564>
20. **Локшин Э. П., Беликов М. Л.** Очистка стоков от фтора (в порядке обсуждения) // Цветные металлы. 2010. № 11. С. 18–21. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15516189>
21. Fluoride in drinking water: the problem and its possible solutions / Y. Veressina [et al.] // Estonian Acad. Sci. Chem. 2001. Vol. 50, no. 2. P. 81–88. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.553.6538&rep=rep1&type=pdf>
22. Defluoridation of Sahara water by small plant electrocoagulation using bipolar aluminium electrodes / N. Mameri [et al.] // Separation and Purification Technology. 2001. Vol. 24, no. 1. P. 113–119. URL: <http://booksc.org/book/14194777/ff152d>
23. **Meenakshi A., Maheshwari R. C.** Fluoride in drinking water and its removal // Journal of Hazardous Materials. 2006. Vol. 137, no. 1. P. 456–463. URL: http://www.academia.edu/31292220/Fluoride_in_drinking_water_and_its_removal
24. **Пилат Б. В.** Способ глубокой очистки питьевых и сточных вод от фтора // Экологические системы и приборы. 2006. № 1. С. 50. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12937708>
25. **Ахмедова Г. Р., Ногаева К. А., Нуркеев С. С.** Способы и технологии обесфторивания воды // Наука, новые технологии и инновации. 2012. № 2. С. 110–113. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25402791>
26. **Тарасевич Ю. И.** Физико-химические основы и технологии применения природных и модифицированных сорбентов в процессах очистки воды // Химия и технология воды. 1998. Т. 20, № 1. С. 42–52.
27. Use of membrane technology for potable water production / A. Gupta [et al.] // Desalination. 2004. Vol. 170. P. 105–112. URL: <https://www.lenntech.com/abstracts/1327/use-of-membrane-technology-for-potable-water-production.html>
28. Ионметрическое определение молибдена (VI) в растворах травления / А. А. Шабарин [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82, № 4. С. 25–27. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25941880>

Поступила 10.11.2017; принята к публикации 14.12.2017; опубликована онлайн 20.03.2018



Об авторах:

Шабарин Александр Александрович, доцент кафедры общей и неорганической химии, Институт физики и химии, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), кандидат химических наук, ResearcherID: W-1047-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6804-8471>, shab_aa@mail.ru

Водяков Владимир Николаевич, профессор кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции, Институт механики и энергетики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430904, Россия, г. Саранск, пос. Ялга, ул. Российская, д. 7), доктор технических наук, ResearcherID: G-6800-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4687-1798>, vnvod@mail.ru

Котин Александр Владимирович, заведующий кафедрой механизации переработки сельскохозяйственной продукции, Институт механики и энергетики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430904, Россия, г. Саранск, пос. Ялга, ул. Российская, д. 7), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: W-1087-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8235-0052>, mpcxp@mail.ru

Кувшинова Ольга Александровна, доцент кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции, Институт механики и энергетики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430904, Россия, г. Саранск, пос. Ялга, ул. Российская, д. 7), кандидат технических наук, ResearcherID: S-8884-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6457-5565>, olga-kuvshinova@rambler.ru

Матюшкина Юлия Ивановна, доцент кафедры общей и неорганической химии, Институт физики и химии, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), кандидат химических наук, ResearcherID: W-1052-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9840-7244>, yrusyaeva@mail.ru

Вклад соавторов:

А. А. Шабарин: анализ литературных данных, разработка методик исследования; В. Н. Водяков: постановка задачи исследования и редактирование; А. В. Котин: научное руководство; О. А. Кувшинова: анализ литературных данных; Ю. И. Матюшкина: проведение экспериментальных работ.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Goryayev D. V., Tikhonova I. V., Korotenkova N. N. [Hygienic assessment of drinking water quality and risks to public health in Krasnoyarsk region]. *Analiz riska zdorovyu* = Health Risk Analysis. 2016; 3:35–43. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=27557647> (In Russ.)
2. Satygo E. A., Danilov E. O. The evaluation of fluorine in water for planning endogenous prevention of dental caries. *Stomatologiya detskogo vozrasta i profilaktika* = Dentistry of Childhood and Prevention. 2011; 10(2):64–66. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=16753215> (In Russ.)
3. Choi A. L., Sun G., Zhang Y., Grandjean Ph. Developmental fluoride neurotoxicity: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Health Perspectives*. 2012; 120(10):1362–1368. Available at: <http://www.pubfacts.com/detail/22820538/Developmental-fluoride-neurotoxicity-a-systematic-review-and-meta-analysis>
4. Verma A., Shetty B. K., Guddattu V., Chourasia M. K., Pundir P. High prevalence of dental fluorosis among adolescents is a growing concern: a school based cross-sectional study from Southern India. *Environmental Health and Preventive Medicine*. 2017; 22(1). DOI: 10.1186/s12199-017-0624-9
5. Barberio A. M., Hosein F. S., Quinonez C., McLaren L. Fluoride exposure and indicators of thyroid functioning in the Canadian population: Implications for community water fluoridation. *Journal of Epidemiology and Community Health*. 2017. 71(10):1019–1025. DOI: 10.1136/jech-2017-209129
6. Savchenkov M. F. The hygienic evaluation of water with various content of fluorine. *Sibirskiy meditsinskiy zhurnal* = Siberian Medical Journal. 2008; 77(2):65–67. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21481665> (In Russ.)

7. Fesenko M. E., Komar V. N., Stasyuk A. I. [The state of neuro-psyche development of children drinking water with a high content of fluorine]. *Zdorovye rebenka* = The Health of the Child. 2011; 8:58–60. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/v/sostoyanie-nervno-psiicheskogo-razvitiya-detey-upotrebyayushchih-pitievuyu-vodu-s-povyshennym-soderzhaniem-flora> (In Russ.)
8. Yadykina T. K., Mikhaylova N. N., Ulanova E. V., Alekhina D. A., Zhukova A. G. [Experimental studies of immune mechanisms in the dynamics of fluoride intoxication]. *Meditsinskaya immunologiya* = Medical Immunology. 2015; 17(5):81–89. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=24499030> (In Russ.)
9. Efimova N. V., Dorogova V. B., Zhouba O. M., Nikiforova V. A. Evaluating fluorine effects in children of Irkutsk area. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya* = Occupational Medicine and Industrial Ecology. 2009; 1:23–26. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=12448685> (In Russ.)
10. Savchenkov M. F., Efimova N. V., Manueva R. S., Nikolaeva L. A., Shin N. S. Thyroid gland pathology in children population exposed to the combination of iodine deficiency and fluoride pollution of environment. *Gigiyena i sanitariya* = Hygiene and Sanitation. 2016; 95(12):1201–1205. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=28089949> (In Russ.)
11. Ayoob S., Gupta A. K. Fluoride in drinking water: A review on the status and stress effects. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2006; 36(6):433–487. DOI: 10.1080/10643380600678112
12. Korotenko O. Yu., Panev N. I., Zakharenkov V. V., Filimonov S. N., Semenova E. A., Panev R. N. Chronic fluoride intoxication as a risk factor for the development of atherosclerosis. *Gigiyena i sanitariya* = Hygiene and Sanitation. 2015; 94(5):91–94. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=23936452> (In Russ.)
13. Filimonov S. N., Lukianova M. V., Razumov V. V., Koryakin M. A., Gorbatsky Ya. A., Epifantseva N. N., Danilov I. P. Hemostasis disorders in patients with occupational fluorosis are risk factors for IHD. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya* = Occupational Medicine and Industrial Ecology. 2005; 4:35–38. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17644429> (In Russ.)
14. Narsimha A., Sudarshan V. Contamination of fluoride in groundwater and its effect on human health: A case study in hard rock aquifers of Siddipet, Telangana State, India. *Applied Water Science*. 2017; 7(5):2501–2512. DOI: 10.1007/s13201-016-0441-0
15. Ullah R., Zafar M. S., Shahani N. Potential fluoride toxicity from oral medicaments: a review. 2017; 20(8):841–848. DOI: 10.22038/IJBMS.2017.9104
16. Dos Santos C. C., Santos E. L., Goncalves F. Evaluation of contaminants in fluorosilicic acid used for public water fluoridation in the Santos region, Brazil. *Water Science and Technology-Water Supply*. 2017; 17(4):921–928. DOI: 10.2166/ws.2016.191
17. Alekseev L. S., Ivleva G. A., Al-Amri Z. Technical and hygienic aspects of potable water fluorination. *Vestnik MGSU* = MGSU Bulletin; 2012; 3:154–158. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17965319> (In Russ.)
18. Ulanova E. V., Fomenko D. V., Kizichenko N. V., Yadykina T. K., Maslennikova E. N. Toxic action of sodium fluoride in experimental fluorosis. *Acta Biomedica Scientifica*. 2009; 1:275–277. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=13010334> (In Russ.)
19. Proncheva L. E., Chudnovskiy S. M. [New technology of regulation of fluoride in drinking water]. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii* = Modern High Technologies. 2004; 1:64–65. Available at: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=21564> (In Russ.)
20. Lokshin E. P., Belikov M. L. Waste-water cleaning with fluorine removal. *Tsvetnyye metally* = Non-Ferrous Metals. 2010; 11:18–21. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=15516189> (In Russ.)
21. Veressinina Y., Trapido M., Anelik V., Munter R. Fluoride in drinking water: The problem and its possible solutions. *Estonian Acad. Sci. Chem.* 2001; 50(2):81–88. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.553.6538&rep=rep1&type=pdf>
22. Mameri N., Lounici H., Belhocine D., Grib H., Piron D. L., Yahiat Y. Defluoridation of Sahara water by small plant electrocoagulation using bipolar aluminium electrodes. *Separation and Purification Technology*. 2001; 24(1):113–119. Available at: <http://booksc.org/book/14194777/ff152d>



23. Meenakshi A., Maheshwari R. C. Fluoride in drinking water and its removal. *Journal of Hazardous Materials*. 2006; 137(1):456–463. Available at: http://www.academia.edu/31292220/Fluoride_in_drinking_water_and_its_removal

24. Pilat B. V. [The Method of deep purification of drinking and waste water of fluorine]. *Ekologicheskiye sistemy i pribory* = Ecological Systems and Devices. 2006; 1:50. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=12937708> (In Russ.)

25. Akhmedova G. R., Nogaeva K. A., Nurkeev S. S. Methods and technologies of water defluorination. *Nauka, novyye tekhnologii i innovatsii* = Science, New Technologies and Innovations. 2012; 2:110–113. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25402791> (In Russ.)

26. Tarasevich Yu. I. [Physicochemical bases and technologies of using natural and modified sorbents in water purification processes]. *Khimiya i tekhnologiya vody* = Water Chemistry and Technology. 1998; 20(1):42–52. (In Russ.)

27. Gupta A., Arora M., Maheshwari R. C., Jain S. K. Use of membrane technology for potable water production. *Desalination*. 2004; 170:105–112. Available at: <http://www.lenntech.com/abstracts/1327/use-of-membrane-technology-for-potable-water-production.html>

28. Shabarin A. A., Matushkina Y. I., Lazareva A. P., Belyanushkin A. V. Ionometric determination of molybdenum (VI) in etching solutions. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* = Factory laboratory. Diagnostics of materials. 2016; 82(4):25–27. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25941880> (In Russ.)

Submitted 10.11.2017; revised 14.12.2017; published online 20.03.2018

About the authors:

Aleksander A. Shabarin, Associate Professor, General and Inorganic Chemistry Chair, Institute of Physics and Chemistry, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Chemistry), ResearcherID: W-1047-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6804-8471>, shab_aa@mail.ru

Vladimir N. Vodyakov, Professor, Chair of Mechanization of Processing of Agricultural Products, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: G-6800-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4687-1798>, vnvod@mail.ru

Aleksander V. Kotin, Head of Chair of Mechanization of Processing of Agricultural Products, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: W-1087-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8235-0052>, mpexp@mail.ru

Olga A. Kuvshinova, Associate Professor, Chair of Mechanization of Processing of Agricultural Products, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: S-8884-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6457-5565>, olga-kuvshinova@rambler.ru

Yulia I. Matushkina, Associate Professor, General and Inorganic Chemistry Chair, Institute of Physics and Chemistry, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Chemistry), ResearcherID: W-1052-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9840-7244>, yrusyaeva@mail.ru

Contribution of the co-authors:

A. A. Shabarin: the analysis of the literature data, development of methodologies; V. N. Vodyakov: statement of the research problem and editing; A. V. Kotin: scientific supervision; O. A. Kuvshinova: the analysis of literature data; Y. I. Matushkina: experimental work.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING

УДК 537.58

DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.048-061



Применение новых технических решений в конструировании термоэлектрических систем

И. Ю. Шелехов*, Т. И. Шишелова, Е. И. Смирнов
*ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский
технический университет» (г. Иркутск, Россия)*
**promteplo@yandex.ru*

Введение. В статье представлен анализ применения полупроводников при конструировании устройств, которые работают с использованием возобновляемых источников энергии; показано, что особый интерес проявляется к системам, работающим на основе термоэлектрической энергии. Задача исследования заключается в расширении спектра применения термоэлектрических систем. Показано, что для преобразования рассеянной тепловой энергии в другой вид энергии целесообразно и эффективно использовать системы, созданные с помощью термоэлектрических элементов. **Материалы и методы.** Исследования проводились в Научно-исследовательской лаборатории современных нагревательных приборов ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». Были изготовлены образцы термоэлектрических модулей с использованием толстопленочной технологии. Сравнивалась эффективность работы термоэлектрического модуля классического вида с радиаторами охлаждения и запатентованной авторами конструкции термоэлектрического модуля с пространственной ориентацией сторон теплообмена. В качестве термоэлектрического материала использовался теллурид висмута (Bi_2Te_3); показания напряжения и тока термоэлектрических модулей фиксировались универсальным цифровым прибором В7-28; показания температуры теплоносителя и нагревательных элементов измерялись термодарами и фиксировались с помощью приборов ТРМ 151 и программного комплекса фирмы «ОВЕН». Токовая нагрузка во время проведения экспериментов была постоянной и составляла 1А; корректировка осуществлялась постоянными резисторами марки МЛТ-1.

Результаты исследования. В статье приводятся результаты исследования термоэлектрических модулей с поддержанием постоянной температуры на одной стороне модуля и заданием градиента температуры в диапазоне от +50 °С до 190 °С на другой. Детально рассматривается взаимное влияние теплопередающих сторон в процессе длительной эксплуатации при различных конструкциях термоэлектрических модулей.

Обсуждение и заключения. Толстопленочная технология – одно из направлений по удешевлению производства термоэлектрических модулей и увеличению эффективности их работы. Исследования в данной области целесообразно проводить в направлении разработки конструкций термоэлектрических модулей и технологий по их изготовлению. Использование толстопленочной технологии изготовления термоэлектрических модулей дает возможность полностью удалить взаимное влияние горячей и холодной сторон, а также увеличить площадь рассеивания тепла в очень широких пределах.



Ключевые слова: термоэлектрическое устройство, термоэлектрический элемент, термоэлектрический модуль, устройство преобразования, преобразование энергии, энергоэффективность, толстопленочная технология

Для цитирования: Шелехов И. Ю., Шишелова Т. И., Смирнов Е. И. Применение новых технических решений в конструировании термоэлектрических систем // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 1. С. 48–61. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.048-061

New Technical Solutions for Designing Thermoelectric Systems

I. Yu. Shelekhov*, T. I. Shishelova, E. I. Smirnov

National Research Irkutsk State Technical University

(Irkutsk, Russia)

**promteplo@yandex.ru*

Introduction. The article presents an analysis of using of semiconductors for the design of renewable energy devices with special attention to thermoelectric energy. The aim of the study is to expand the range of using of thermoelectric systems. The article demonstrates the effectiveness of using the systems based on thermoelectric elements to convert the scattered thermal energy into another type of energy.

Materials and Methods. Bismuth telluride (Bi_2Te_3) material was used as a thermoelectric. The readings of the voltage and amperage of thermoelectric modules were measured with the V7-28 universal digital instrument. Temperature of the coolant and heating elements was measured by thermocouples and recorded with the TRM 151 and instruments with OWEN software. Constant current load during the experiments was 1A. Load correction was carried out with the MLT-1 permanent resistors.

Results. The article presents the results of studying the thermoelectric modules, which maintained a constant temperature on one side of the module with difference in temperature from $+50^\circ\text{C}$ to $+190^\circ\text{C}$ on the other side. The authors described in detail the mutual influence of heat transfer sides in the process of long-term operation with various designs of thermoelectric modules.

Discussion and Conclusions. Thick film technology is one of the directions to reduce the cost of production of thermoelectric modules and increase the efficiency of their operation. The development of new designs of thermoelectric modules and new technologies for their production is desirable. The use of thick film technology for manufacturing thermoelectric modules makes it possible to completely remove the mutual influence of the hot and cold sides, and also to increase the heat dissipation area over a wide range.

Keywords: thermoelectric device, thermoelectric element, thermoelectric module, conversion device, energy conversion, energy efficiency, thick film technology

For citation: Shelekhov I. Yu., Shishelova T. I., Smirnov E. I. New Technical Solutions for Designing Thermoelectric Systems. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(1):48–61. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.048-061

Введение

Одним из приоритетных направлений развития современной науки являются разработки в области возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Значительное место в данном направлении занимают микрогенераторы на основе полупроводниковых элементов.

Ярким примером служит солнечная энергетика, которая уверенно лидирует в области применения, опередив биоэнергетику и ветроэнергетику [1]. Фактически разработки в области электронных компонентов по темпам развития опережают разработки в области биологических, химических и механических

процессов. При этом можно констатировать высокий потенциал разработок в данной сфере. Появляются новые направления, где применение полупроводниковых элементов имеет неоспоримое преимущество (например, компенсация тепловых потерь зданий и сооружений различного назначения).

С помощью современных утепляющих материалов можно решить ряд задач по снижению тепловых потерь от ограждающих конструкций и по транспортировке теплоносителя, однако эффективно бороться с тепловыми потерями, возникающими при воздухообмене и утилизации отходов жизнедеятельности, все еще невозможно. В последние годы проявляется особый интерес к системам, которые работают на основе термоэлектрической энергии. Расширение технологических возможностей, появление новых термоэлектрических материалов привело к созданию новых термоэлементов с повышенным коэффициентом полезного действия (КПД) [2].

В жизнедеятельности человека процесс преобразования какого-либо вида энергии в тепло является основным, причем большая часть этого тепла рассеивается в окружающую среду. По оценкам Программы развития Организации Объединенных Наций¹, потери энергии и энергоемкость экономики в РФ в 1,5–2,5 раза выше, чем в Европе, где среднеловшее потребление энергии превышает аналогичный показатель в РФ [3]. Причем основные потери энергии происходят в виде рассеянного низкопотенциального теплового потока.

Преобразование рассеянной тепловой энергии в другой вид энергии – сложная задача, решить которую в ряде случаев возможно только с помощью термоэлектрических элементов. Системы, созданные на основе таких эле-

ментов, успешно конкурируют с традиционными методами преобразования энергии до нескольких сотен ватт, а для объектов со специальными требованиями по массогабаритным, виброакустическим и надежностным характеристикам практически не имеют конкурентов [4]. Термоэлектрические элементы предоставляют новые возможности при разработке конструкций специальных систем, преобразующих тепловые потери в электрическую энергию для дальнейшего применения [5].

Невозможно избежать тепловые потери при эксплуатации зданий, однако их можно оптимизировать, систематизировать, преобразовать и направить обратно. Как правило, для этих целей используются рекуперационные установки; наиболее обширная область применения данных приборов – системы вентиляции. Работа рекуперационных установок основана на принципе «теплового насоса» – передачи энергии от одного тела к другому, причем тело, у которого забирается энергия, может иметь более низкую температуру, чем тело, которому энергия передается. Несмотря на достигнутые успехи в данной области, производство и внедрение ВИЭ, работа которых основана на внутреннем энергетическом ресурсе, не имеет массового характера не только в РФ, но и во всем мире [6].

Использование термоэлектрических элементов дает возможность возврата части энергетических ресурсов в виде электрической энергии постоянного тока для питания светодиодных светильников, цепей управления и контроля приборов учета, электронной техники, включая персональные компьютеры; для зарядки аккумуляторных батарей; для обеспечения резервным питанием при аварийных ситуациях и т. д. [7].

Кроме этого, при использовании термоэлектрических элементов реша-

¹ Программа развития Организации Объединенных Наций. URL: <http://www.undp.org>



ется одна из основных проблем ВИЭ: расстояние между источником и потребителем энергии сводится к минимуму. К преимуществам термоэлектрических систем по сравнению с традиционными системами относят неограниченный ресурс работы, отсутствие подвижных частей, бесшумность, экологичность, чистота, универсальность в отношении способов подвода и отвода тепловой энергии и возможность рекуперации отработанной энергии [8].

Преимущества очевидны, но существует ряд факторов, которые ограничивают широкое применение термоэлектрических элементов: низкая производительность, сложность технологического процесса, низкая эффективность термоэлектрического модуля из-за высокого коэффициента теплопроводности проводников *n*- и *p*-типов и взаимного влияния пластин, узкий спектр применения, поскольку использование термоэлектрических преобразователей возможно в условиях, подразумевающих любые механические воздействия – удары, падения, тряску. Кроме этого, источники или потребители тепловой энергии, как правило, пространственно удалены друг от друга, вследствие чего требуются дополнительные конструктивные решения для перемещения энергии по направлению к теплообменным пластинам преобразователя или от них [9].

В бытовой сфере термоэлектрические элементы практически не применяются из-за высокой стоимости по отношению к массовому бытовому оборудованию (исключение – бытовые автомобильные холодильники). Кроме этого, применение термоэлектрических модулей ограничивается тем, что массовые технологии производства настроены на изготовление термоэлектрических модулей на стандартной ситалловой подложке размерами 40x40 и 60x48 мм [10].

Обзор литературы

Широкое внедрение систем на основе термоэлектрических элементов

сдерживают не столько электрофизические свойства, хотя это немаловажный фактор, сколько технологические и конструктивные особенности технологии, по которой их производят. Если провести аналогию с солнечными батареями, то тот факт, что у современных батарей величина КПД находится в диапазоне 15–25 % (на практике не выше 15 %), а у фотоэлементов из аморфного кремния, на базе которых изготавливают тонкопленочные гибкие панели, – 5–6 %, не оказывает существенного влияния на их распространение [11]. Эффективность термоэлектрических элементов и фотоэлементов находится на одном уровне, но производство фотоэлементов проще и дешевле. Кроме этого, в отличие от фотоэлементов, применение термоэлектрических элементов требует дополнительных устройств для осуществления теплообмена. Анализ литературных данных показывает, что на эффективность работы термоэлектрических систем в большей степени влияют технические решения при проектировании, чем электрофизические характеристики термоэлектрических спаев.

В статье А. С. Марченко и А. Б. Сулина [12] показано, что на современном этапе развития термоэлектрического приборостроения внешние потери в реальной системе сопоставимы с внутренними потерями в термоэлементах. Одним из эффективных методов снижения внутренних потерь является разработка новых конструкций теплообменных устройств. Например, в статьях [13–17] приводятся результаты анализа зависимости площади теплообмена и рассматриваются конструктивные решения, влияющие на снижение внутренних тепловых потерь.

Анализ конструктивных решений в области объемного проектирования конструкций модулей на основе термоэлектрических элементов показал, что применение данных элементов существенно упрощает конструкции систем,

снижает их стоимость и увеличивает эффективность. В работе А. Х. Снапьян и соавт. предлагается оригинальное техническое решение по созданию кольцевого термоэлектрического модуля [18]. Данное решение открывает новые перспективы для дальнейшего совершенствования конструкций термоэлектрических модулей. Особый интерес вызывают исследования авторов, которые работают в области тонкопленочной технологии и специализируются на создании объемных термоэлектрических систем [19–20]. Однако предлагаемые в данных работах технические решения сложно применить в массовом производстве.

Материалы и методы

На современном этапе развития термоэлектрического приборостроения внешние технические потери в реальных системах сопоставимы с внутренними потерями в термоэлементах. В основном это обусловлено взаимным влиянием теплопередающих пластин и теплопроводностью термоэлектрических спаев. Конструкция классического термоэлектрического модуля представляет собой объемную фигуру, где между двух одинаковых параллельных плоскостей небольших размеров последовательно формируются токопроводящие дорожки, которые соединены столбиками полупроводников *n*- и *p*-типа. Расстояние между пластинами определяется техническими возможностями применяемых технологий для изготовления полупроводниковых столбиков (1–3 мм). Площадь теплопередающих пластин незначительна, поэтому конструктивные решения при проектировании радиаторов нагрева и охлаждения не дают существенных результатов в расширении спектра при-

менения и увеличения эффективности термоэлектрических систем.

Для того чтобы применение термоэлектрических элементов приобрело массовый характер, необходимо вести работы по конструированию термоэлектрических модулей технологии массового производства.

Цель данного исследования – применение толсто пленочной технологии для создания термоэлектрического модуля с изменением пространственной ориентации зон теплообмена и возможностью значительного увеличения расстояния между ними.

Суть технологии заключается в продавливании через трафарет, нанесенный на сетку, обладающей определенными свойствами пасты. В зависимости от толщины сетки и топологического рисунка можно менять как ширину, так и толщину наносимого слоя, а также варьировать геометрические формы. После нанесения паста проходит процесс полимеризации (вжигания) в специальных печах и приобретает необходимые электрофизические свойства. В мировой практике данная технология широко применяется для массового производства резисторов, конденсаторов и других электронных компонентов.

На ее основе нами был разработан новый способ изготовления пространственно ориентированного термоэлектрического модуля². В отличие от классической технологии, мы переносим объемную фигуру в плоскость и создаем модуль на этой плоскости: на одной части находятся полупроводники *n*-типа; на другой – *p*-типа. При этом размер плоскости может быть значительным, плоскости – пространственно ориентированными, а части плоскостей и расстояние между ними – различными.

² Пат. 2663748, Российская Федерация. МПК H01L35/32. Пространственно ориентированный термоэлектрический модуль и способ его изготовления / И. Ю. Шелехов, Е. И. Смирнов, К. П. Кашко, И. В. Шелехова; заявитель и патентообладатель ООО «Термостат+». № 2015153586; заявл. 14.12.2015; опубл. 28.02.2017, Бюл. № 7. 11 с. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/261/2611562.html>



Происходит процесс закрепления полупроводниковых термоэлементов п- и р-типов проводимости на диэлектрическую подложку (плоскость), на которую методом сетко-трафаретной печати предварительно наносят соединительные (для одноименных элементов) и коммутирующие (для разноименных элементов) дорожки пастой с низким удельным сопротивлением. После этого с помощью диэлектрической пасты наносятся барьерные дорожки для образования углублений (ячеек) между соединительными и коммутирующими дорожками. В углубления (ячейки) наносятся полупроводниковые дорожки пастой, изготовленной на основе полупроводников п-типа и р-типа, которые затем подвергаются процессу спекания под давлением.

Для проведения экспериментов было изготовлено 2 образца термоэлектрических модулей: один классического вида, второй с пространственной ориентацией. Образцы изготавливались на алюминиевой подложке с диэлектрическим покрытием; в качестве термоэлектрического материала использовался теллурид висмута (Bi_2Te_3); количество спаев в образцах было одинаковым – 128. В образце с пространственной ориентацией теплопередающие поверхности были разнесены в параллельной плоскости, причем площадь теплопоглощающей стороны была увеличена в 2 раза по сравнению с тепловыделяющей стороной. Ряд ученых, применяя новые технические решения при конструировании и проектировании радиаторов, отмечали, что данное соотношение увеличивает эффективность работы термоэлектрических модулей [21–23].

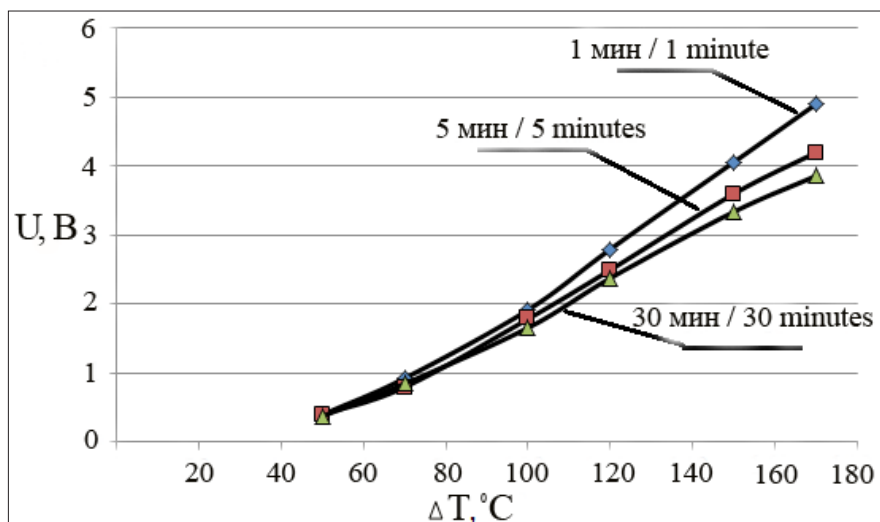
Сравнительный анализ проводился на специализированном стенде в На-

учно-исследовательской лаборатории современных нагревательных приборов ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»; показания напряжения и тока термоэлектрических модулей фиксировались универсальным цифровым прибором В7-28; показания температуры теплоносителя и нагревательных элементов измерялись термодатчиками и фиксировались с помощью приборов ТРМ 151 и программного комплекса фирмы «ОВЕН». Токовая нагрузка во время проведения экспериментов была постоянной и составляла 1А; корректировка осуществлялась постоянными резисторами марки МЛТ-1.

Результаты исследования

Первый образец (термоэлектрический модуль классического вида) испытывался совместно с радиаторами охлаждения. Радиаторы охлаждения были собраны в соответствии с методикой, изложенной в статье М. Ф. Иванова, А. В. Царева, В. В. Чугункова [24]. Одна сторона термоэлектрического модуля охлаждалась с помощью проточной водопроводной воды, на поверхности которой поддерживалась температура $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$; вторая пошагово нагревалась до температуры $+190\text{ }^{\circ}\text{C}$ с помощью электронагревателей. Для определения величины взаимного влияния теплопередающих сторон на эффективность работы термоэлектрического модуля изменялось время выдержки фиксированной температуры. Эксперименты проводились при фиксации температуры на второй стороне термоэлектрического модуля в течение 1 мин, 5 мин и 30 мин. Результаты испытания термоэлектрического модуля классического вида представлены в табл. 1.

На рис. 1. представлены графики напряжений, которые вырабатывал термоэлектрический модуль в зависимости от времени фиксации температуры.



Р и с. 1. Графики напряжений, вырабатываемых термоэлектрическим модулем в зависимости от времени фиксации температуры (классическое исполнение)

Fig. 1. Graphic of voltage generated by the thermoelectric module depending on time of fixing the temperature (the classic version)

Таблица 1

Table 1

Результаты обработки данных при испытании термоэлектрического модуля классического вида

Results of data processing during the test of the classic thermoelectric module

$\Delta T, ^\circ C$	U_1, V	U_2, V	U_3, V	$K, \%$
50	0,40	0,40	0,38	5,00
70	0,93	0,80	0,85	8,60
100	1,92	1,79	1,66	13,54
120	2,80	2,50	2,38	15,00
150	4,06	3,60	3,34	17,73
170	4,90	4,20	3,86	21,22

Примечание: $\Delta T, ^\circ C$ – градиент температуры между теплопередающими сторонами термоэлектрического модуля; U_1, V – напряжение, вырабатываемое термоэлектрическим модулем при фиксации температуры в течение 1 мин; U_2, V – напряжение, вырабатываемое термоэлектрическим модулем при фиксации температуры в течение 5 мин; U_3, V – напряжение, вырабатываемое термоэлектрическим модулем при фиксации температуры в течение 30 мин; $K, \%$ – процентное изменение вырабатываемого напряжения в зависимости от времени фиксации температуры (время фиксации температуры в течение 30 мин по отношению к времени фиксации температуры в течение 1 мин) / Note: $\Delta T, ^\circ C$ – temperature gradient between the heat transfer sides of the thermoelectric module; U_1, V – voltage produced by the thermoelectric module with temperature fixed for 1 minute; U_2, V – voltage produced by the thermoelectric module when temperature fixed for 5 minutes; U_3, V – voltage produced by the thermoelectric module when temperature fixed for 30 minutes; $K, \%$ – percentage change in the produced voltage, depending on time of fixing the temperature (the time of fixing the temperature for 30 minutes in relation to time of fixing the temperature for 1 minute)



Функция зависимости электродвижущей силы от температуры является линейной. Из представленных данных видно, что несмотря на применение современных технологий по эффективному снижению взаимного влияния теплопередающих сторон в термоэлектрическом модуле, в классическом исполнении избежать данного влияния не удалось. Причем при длительной эксплуатации оно усиливается и снижает эффективность с 5 до 20 %. Также не следует забывать, что для увеличения эффективности работы термоэлектрического модуля были применены радиаторы, стоимость которых в несколько раз превышает стоимость самого модуля.

Второй образец (с пространственной ориентацией сторон) испытывал-

ся без дополнительных радиаторов; охлаждение осуществлялось контактным способом путем механического крепления одной части модуля к водопроводной трубе, а другой – к электронагревателю³. Измерение данных осуществлялось аналогично испытанию первого образца. Результаты испытания термоэлектрического модуля с пространственной ориентацией сторон представлены в табл. 2.

На рис. 2. представлен график напряжения, которое вырабатывал термоэлектрический модуль в период проведения экспериментов. В отличие от первого эксперимента, отсутствовала необходимость строить несколько графиков: поскольку значения вырабатываемого напряжения практически

Таблица 2

Table 2

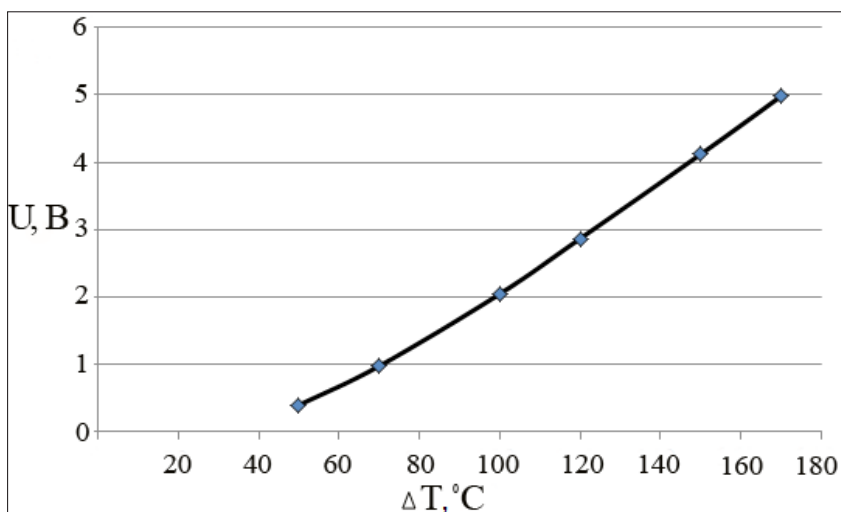
Результаты обработки данных при испытании термоэлектрического модуля с пространственной ориентацией сторон

The results of data processing during the test of the thermoelectric module with spatial orientation of the sides

$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_3, \text{В}$	$K, \%$
50	0,40	0,39	0,40	0,00
70	0,98	0,99	0,99	-1,02
100	2,05	2,10	2,10	-2,44
120	2,87	2,91	2,89	-0,70
150	4,12	4,11	4,12	0,00
170	4,98	5,10	5,05	-1,41

Примечание: $\Delta T, ^\circ\text{C}$ – градиент температуры между теплопередающими сторонами термоэлектрического модуля; $U_1, \text{В}$ – напряжение, вырабатываемое термоэлектрическим модулем при фиксации температуры в течение 1 мин; $U_2, \text{В}$ – напряжение, вырабатываемое термоэлектрическим модулем при фиксации температуры в течение 5 мин; $U_3, \text{В}$ – напряжение, вырабатываемое термоэлектрическим модулем при фиксации температуры в течение 30 мин; $K, \%$ – процентное изменение вырабатываемого напряжения в зависимости от времени фиксации температуры (время фиксации температуры в течение 30 мин по отношению к времени фиксации температуры в течение 1 мин) / Note: $\Delta T, ^\circ\text{C}$ – temperature gradient between the heat transfer sides of the thermoelectric module; $U_1, \text{В}$ – voltage produced by the thermoelectric module with temperature fixed for 1 minute; $U_2, \text{В}$ – voltage produced by the thermoelectric module when temperature fixed for 5 minutes; $U_3, \text{В}$ – voltage produced by the thermoelectric module when temperature fixed for 30 minutes; $K, \%$ – percentage change in the produced voltage, depending on time of fixing the temperature (the time of fixing the temperature for 30 minutes in relation to time of fixing the temperature for 1 minute)

³ Шелехов И. Ю., Смирнов Е. И., Иноземцев В. П. Новые возможности и перспективы использования термоэлектрических генераторов // Современная наука: теоретический и практический взгляд : сб. Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2015. С. 48–52. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23275824>
Mechanical engineering



Р и с. 2. График напряжения, вырабатываемого термоэлектрическим модулем в зависимости от времени фиксации температуры (с пространственной ориентацией сторон)

F i g. 2. The graph of voltage generated by the thermoelectric module depending on the time of fixation temperature (with a spatial orientation of the parties)

одинаковы, незначительные отклонения можно отнести к статистической погрешности. Кроме этого, видно, что зависимость носит линейный характер, что показывает отсутствие взаимного влияния теплопередающих сторон. Эффективность термоэлектрического модуля при длительной эксплуатации не снижается, а незначительное увеличение эффективности, скорее всего, связано с изменением внутреннего сопротивления данного модуля при нагреве.

Обсуждение и заключения

Вопросы повышения эффективности термоэлектрических модулей в настоящее время рассматривается в рамках 3 основных научных направлений:

- разработка новых термоэлектрических материалов с высоким значением добротности (z);
- оптимизация соотношения сопротивления нагрузки и внутреннего сопротивления модуля;
- разработка конструкций модулей с оптимальными геометрическими размерами.

Наши научные исследования ведутся в направлении оптимизации геометрических размеров. Как правило, работы по оптимизации геометрических размеров заключаются в верном подборе соотношения между сопротивлением модуля (R) и теплопроводностью p - и n -элементов (G), поскольку эффективность термоэлектрического модуля имеет обратную зависимость от этих параметров. Сопротивление и теплопроводность проводника зависят от его площади (S), длины (l), удельной электропроводности (σ) и удельной теплопроводности (λ):

$$R = \frac{l}{S \cdot \sigma}; \quad (1)$$

$$G = \frac{S \cdot \lambda}{l}. \quad (2)$$

При расчете эффективности термоэлектрического модуля, фактически, учитывается отношение удельной теплопроводности к удельной электропроводности, поскольку добротность



термоэлектрического модуля рассчитывается по формуле:

$$Z = \frac{\alpha^2}{R \cdot G}, \quad (3)$$

где α – коэффициент Зеебека; R и G – две взаимозависимые величины.

Известно, что с увеличением электропроводности увеличивается теплопроводность и наоборот. В конструкции классического термоэлектрического модуля р- и n-элементы расположены перпендикулярно теплопередающим поверхностям и параллельно друг к другу на таком расстоянии, что тепловой поток распределен практически равномерно и направлен от одной поверхности к другой, а потери в окружающую среду практически отсутствуют.

Для эксперимента использовались два термоэлектрических модуля с аналогичными техническими характеристиками и идентичными площадями теплоотдачи. В первом случае (термоэлектрический модуль классического вида) площадь теплоотдачи определялась дополнительными радиаторами, во втором (термоэлектрический модуль с пространственной ориентацией сторон) – технологическими возможностями толсто пленочной технологии. В термоэлектрическом модуле с пространственной ориентацией сторон р- и n-элементы расположены последовательно между теплопередающими поверхностями, а тепловой поток направлен в окружающую среду.

Согласно результатам проведенных экспериментов, работы по оптимизации геометрических размеров термоэлектрических модулей при использовании классических технологий практически исчерпали свои возможности.

Из результатов также видно, что работы в области совершенствования термоэлектрических устройств, связанные с улучшением рассеивания тепла с площади теплопередающих сторон, существенно увеличивают стоимость термоэлектрических устройств по срав-

нению с применяемыми техническими решениями в области толсто пленочной технологии. Изменение топологического рисунка практически не сказывается на стоимости самого устройства.

Дальнейшая работа в области оптимизации геометрических размеров с использованием толсто пленочной технологии будет способствовать созданию новых термоэлектрических материалов, поскольку снимет ограничение в применении материалов с высоким коэффициентом теплопроводности. Толсто пленочная технология – это одно из направлений удешевления производства термоэлектрических модулей и увеличения эффективности их работы. С помощью известных топологий выделяемое или поглощаемое тепло с термоэлектрического модуля можно переместить в сторону, распределить его на большую площадь или, наоборот, сконцентрировать на меньшей площади [26]. Данная технология дает возможность полностью удалить взаимное влияние горячей и холодной сторон, а также увеличить площадь рассеивания тепла в очень широких пределах. По мере повышения своей эффективности термоэлектрические модули смогут конкурировать с традиционными тепловыми насосами в области более высоких мощностей и, таким образом, расширить свой спектр применения.

Продвижение большой энергетики в совокупности с новыми инновационными энергосберегающими технологиями может дать преимущество на российском и международном рынках. Появится возможность предлагать потребителю энергию совместно с технологией ее сбережения и рядом дополнительных сервисов в виде различных станций по зарядке электронных устройств (от мобильных телефонов до электромобилей). Причем данный сервис возможен даже при отсутствии прямой подачи электрической энергии и на разных уровнях, от частных домов до больших промышленных объектов.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Елистратов В. В. Опыт внедрения ВИЭ в мире и России // Академия энергетики. 2009. Т. 28, № 2. С. 56–66. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21849502>
2. Gujrathi A. S., Gehlot D. Testing and performance of convex lens concentrating solar power panel prototype // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2008. Vol. 4, Issue 6. P. 242–246. URL: <http://docplayer.net/2935735-Testing-and-performance-of-the-convex-lens-concentrating-solar-power-panel-prototype.html>
3. Сони́на Е. А. Инвестиции в возобновляемую энергетику // Молодой ученый. 2015. № 10. С. 800–806. URL: <http://www.moluch.ru/archive/90/18992>
4. Tan G., Zhao D. Study of a thermoelectric space cooling system integrated with phase change material // Applied Thermal Engineering. Vol. 86, no. 5. P. 187–198. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.054
5. Anatyshuk L. I., Prybyla A. V. Optimization of power supply system of thermoelectric liquid pump // Journal of Thermoelectricity. 2015. Vol. 6. P. 51–56. URL: <http://www.its.org/content/journal-thermoelectricity>
6. Анализ возможности использования термоэлектрических генераторов в системах вентиляции / И. Ю. Шелехов [и др.] // Научное обозрение. 2015. № 8. С. 67–75. URL: https://istina.msu.ru/media/publications/article/eb7/5f7/10454368/07_08_2015.pdf
7. Enescu D., Virjoghe E. O. A review on thermoelectric cooling parameter sand performance // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 38. P. 903–916. URL: <https://www.elsevier.com/catalog?producttype=journal>
8. Anatyshuk L. I., Prybyla A. V. Comparative analysis of thermoelectric and compression heat pumps for individual air-conditioners // Journal of Thermoelectricity. 2016. Vol. 2. P. 31–39. URL: http://jt.inst.cv.ua/jt_2016_02_en.pdf
9. Опыт использования термоэлектрических генераторов / И. Ю. Шелехов [и др.] // Фундаментальные исследования. 2013. № 11, Ч. 5. С. 919–923. URL: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=33225>
10. Шостаковский П. Термоэлектрические источники альтернативного электропитания // Компоненты и технологии. 2010. Т. 113, № 12. С. 131–138. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15543061>
11. Ajao K. R., Oladosu O. A., Popoola O. T. Cost-benefit analysis of wind-solar power generation by HOMER power optimization software // Journal of Applied Science and Technology. 2011. Vol. 16, no. 1–2. P. 52–57. DOI: 10.4314/jast.v16i1-2.64779
12. Марченко А. С., Сулин А. Б. Эффективные решения теплообменников для термоэлектрических трансформаторов теплоты // Вестник Дагестанского государственного технического университета (Сер. «Технические науки»). 2016. Т. 43, № 4. С. 63–72. DOI: 10.21822/2073-6185-2016-43-4-63-72
13. Исмаилов Т. А., Мирземагомедова М. М. Исследование стационарных режимов работы термоэлектрических теплообменных устройств // Вестник Дагестанского государственного технического университета (Сер. «Технические науки»). 2016. Т. 40, № 1. С. 23–30. URL: <https://socionet.ru/~cyrcitec/json/spz/neicon/vestnik/y:2016:i:1:p:23-30.pdf>
14. Sinton C. W., Winnett R. Solar powered water pumping systems in New York State // New York State for Energy Research and Development Authority National Renewable Energy Laboratory Website. URL: http://www.nrel.gov/clean_energy/solar.html
15. Opportunities and challenges in micro and nano technologies for concentrating photovoltaic cooling / M. Leonardo [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 20. P. 595–610. URL: www.elsevier.com/locate/rser
16. Analysis of thermosyphon/heat pipe integration for feasibility of dry cooling for thermoelectric power generation / S. P. Benn [et al.] // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 104, no. 5. P. 358–374. URL: <https://www.journals.elsevier.com/applied-thermal-engineering>
17. Theoretical and experimental study on heat pipe cooled thermoelectric generators with water heating using concentrated solar thermal energy / A. Date [et al.] // Solar Energy. 2014. Vol. 105. P. 656–668. URL: <https://www.journals.elsevier.com/solar-energy>



18. Кольцевой термоэлектрический модуль на основе теллурида свинца [Электронный ресурс] / А. Х. Снапьян [и др.]. URL: http://www.ioffe.ru/Thermolab/seminar2012/oral/28o_Snapian.pdf
19. Громов Г. Объемные или тонкопленочные термоэлектрические модули // Компоненты и технологии. 2014. № 8. С. 108–113. URL: <http://www.rmtltd.ru/docs/technology/publications/Components%20and%20Technologies%202014.pdf>
20. Васильев Е. Н., Деревянко В. А. Расчет эффективности термоэлектрических модулей для охлаждения радиоэлектронных элементов // Решетневские чтения. 2013. Т. 1, № 17. С. 211–213. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21801868>
21. Sarkar A., Mahapatra S. K. Role of surface radiation on the functionality of thermoelectric cooler with heat sink // Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 69, Issues 1-2. P. 39–45. URL: <https://www.journals.elsevier.com/applied-thermal-engineering>
22. Wang X., Yu J., Ma M. Optimization of heat sink configuration for thermoelectric cooling system based on entropy generation analysis // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 63. P. 361–365. URL: https://elibrary.ru/title_about.asp?id=490
23. Zhu L., Tan H., Yu J. Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications // Energy Conversion and Management. 2013. Vol. 76. P. 685–690. URL: <https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=315>
24. Иванов М. Ф., Царев А. В., Чугунков В. В. Моделирование параметров термоэлектрических охлаждающих устройств // Инженерный вестник. 2014. № 11. С. 93–103. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/745021.html>
25. Исследования параметров термоэлектрических генераторов, изготовленных по толстопленочной технологии / И. Ю. Шелехов [и др.] // Металлургия: технологии, инновации, качество. 2015. С. 373–377. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25222657>

Поступила 13.11.2017; принята к публикации 10.01.2018; опубликована онлайн 20.03.2018

Об авторах:

Шелехов Игорь Юрьевич, доцент кафедры городского строительства и хозяйства, Институт архитектуры, строительства и дизайна, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), кандидат технических наук, ResearcherID: V-3045-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7677-3187>, promteplo@yandex.ru

Шिशелова Тамара Ильинична, профессор кафедры физики, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), доктор технических наук, ResearcherID: V-2981-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2372-8144>, tamara.shishelova@gmail.com

Смирнов Евгений Игоревич, аспирант кафедры инженерных коммуникаций и систем жизнеобеспечения, Институт архитектуры, строительства и дизайна, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), ResearcherID: V-3117-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4999-7342>, jeka7.7.7@mail.ru

Вклад соавторов:

И. Ю. Шелехов: анализ литературных данных, научное руководство, постановка задачи исследования, обработка данных, написание текста статьи; Т. И. Шиселова: анализ литературных данных, верстка и редактирование текста; Е. И. Смирнов: анализ литературных данных, подготовка образов, сбор и анализ аналитических и практических материалов, разработка методики проведения эксперимента, компьютерная реализация решения задачи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Elistratov V. V. [Experience of introduction of renewable energy in the world and Russia]. *Akademiya energetiki* = Energy Academy. 2009; 2(28):56–66. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21849502> (In Russ.)
2. Gujrathi A. S., Gehlot D. Testing and performance of convex lens concentrating solar power panel prototype. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2008; 4(6):242–246. Available at: <http://docplayer.net/2935735-Testing-and-performance-of-the-convex-lens-concentrating-solar-power-panel-prototype.html>
3. Sonina Ye. A. [Investments in renewable energy]. *Molodoy uchenyy* = Young Scientist. 2015; 10:800–806. Available at: <http://www.moluch.ru/archive/90/18992> (In Russ.)
4. Tan G., Zhao D. Study of a space thermoelectric cooling system integrated with phase change material. *Applied Thermal Engineering*. 2015; 86(5):187–198. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.054
5. Anatychuk L. I., Prybyla A. V. Optimization of power supply system of thermoelectric liquid pump. *Journal of Thermoelectricity*. 2015; 6:51–56. Available at: <http://www.its.org/content/journal-thermoelectricity>
6. Shelekhov I. Yu., Smirnov E. I., Inozemtsev V. P., Fedorova E. D. [Analysis of possibilities of using thermoelectric generators in the ventilation systems]. *Nauchnoye obozreniye* = Scientific Review. 2015; 8:67–75. Available at: https://istina.msu.ru/media/publications/article/eb7/5f7/10454368/07_08_2015.pdf (In Russ.)
7. Enescu D., Virjoghe E. O. A review on thermoelectric cooling performance parameter sand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014; 38:903–916. Available at: <http://www.elsevier.com/catalog?producttype=journal>
8. Anatychuk L. I., Prybyla A. V. Comparative analysis of thermoelectric and compression heat pumps for individual air-conditioners. *Journal of Thermoelectricity*. 2016; 2:31–39. Available at: http://jt.inst.cv.ua/jt_2016_02_en.pdf
9. Shelekhov I. Yu., Smirnov E. I., Rupasov V. L., Shishelova T. I. [Experience in the use of thermoelectric generators]. *Fundamentalnyye issledovaniya* = Fundamental Research. 2013; 11(5):919–923. Available at: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=33225> (In Russ.)
10. Shostakovskiy P. [Thermoelectric sources of alternative supply]. *Komponenty i tekhnologii* = Components and Technologies. 2010; 12(113):131–138. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=15543061> (In Russ.)
11. Ajao K. R., Oladosu O. A., Popoola O. T. Cost-benefit analysis of wind-solar power generation by HOMER power optimization software. *Journal of Applied Science and Technology*. 2011; 16(1-2):52–57. DOI: 10.4314/jast.v16i1-2.64779
12. Marchenko A. S., Sulin A. B. Effective solutions of heat exchangers for thermoelectric heat transformers. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki* = Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016; 43(4):63–72. DOI: 10.21822/2073-6185-2016-43-4-63-72 (In Russ.)
13. Ismailov T. A., Mirzemagomedova M. M. Research of stationary operating modes of thermoelectric heatexchange devices. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki* = Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016; 1(40):23–30. Available at: <http://socionet.ru/~cyrcitec/json/spz/neicon/vestnik/y:2016:i:1:p:23-30.pdf> (In Russ.)
14. Christopher C. W., Winnett S. R. Solar powered water pumping systems in New York State. New York State for Energy Research and Development Authority National Renewable Energy Laboratory. Available at: http://www.nrel.gov/clean_energy/solar.html
15. Micheli L., Sarmah N., Luo X., Reddy K. S., Mallick T. K. Opportunities and challenges in micro and nano technologies for concentrating photovoltaic cooling: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013; 20:595–610. Available at: <https://strathprints.strath.ac.uk/45144>
16. Benn S. P., Poplaski L. M., Faghri A., Bergman Th. L. Analysis of thermosyphon heat pipe integration for feasibility of dry cooling for thermoelectric power generation. *Applied Thermal Engineering*. 2016, 104(5):358–374. Available at: <http://www.journals.elsevier.com/applied-thermal-engineering>
17. Date A., Dixon C., Akbarzadeh A. Theoretical and experimental study on heat pipe cooled thermoelectric generators with water heating using concentrated solar thermal energy. *Solar Energy*. 2014; 105:656–668. Available at: <http://www.journals.elsevier.com/solar-energy>



18. Snapyan A. Kh., Grechko N., Kovyrzin A. V., Sudak N. M., Ingilizyan P. N. [Ring thermoelectric module based on lead telluride]. Available at: http://www.ioffe.ru/Thermolab/seminar2012/oral/28o_Snapyan.pdf (In Russ.)
19. Gromov G. [Volumetric or thin-film thermoelectric modules]. *Komponenty i tekhnologii* = Components and Technologies. 2014; 8:108–113. Available at: <http://www.rmtld.ru/docs/technology/publications/Components%20and%20Technologies%202014.pdf> (In Russ.)
20. Vasiliev Ye. N., Derevianko V. A. Calculation of thermoelectric modules efficiency for cooling the radio electronic components. *Reshetnevskiy chteniye* = Reshetnev's Readings. 2013; 1(17):211–213. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21801868> (In Russ.)
21. Sarkar A., Mahapatra S. K. Role of surface radiation on the functionality of thermoelectric cooler with heat sink. *Applied Thermal Engineering*. 2014; 69(1-2):39–45. Available at: <http://www.journals.elsevier.com/applied-thermal-engineering>
22. Wang X., Yu J., Ma M. Optimization of heat sink configuration for thermoelectric cooling system based on the entropy generation analysis // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013; 63:361–365. URL: http://elibrary.ru/title_about.asp?id=490
23. Zhu L., Tan H., Yu J. Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications. *Energy Conversion and Management*. 2013; 76:685–690. URL: <http://elibrary.ru/contents.asp?titleid=315>
24. Ivanov M. F., Tsarev A.V., Chugunkov V. V. [Modelling of thermoelectric cooling devices]. *Inzhenernyy Vestnik* = Engineering Journal. 2014; 11:93–103. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/745021.html> (In Russ.)
25. Shelekhov I. Yu., Smirnov E. I., Inozemtsev V. P. [Research of parameters of thermoelectric generators fabricated on thick-film technology]. In: *Proceedings of the 19th International Scientific-Practical Conference "Metallurgy: Technologies, Innovations, Quality"*. 2015; p. 48–52. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=23275824> (In Russ.)

Submitted 13.11.2017; revised 10.01.2018; published online 20.03.2018

About the authors:

Igor Yu. Shelekhov, Associate Professor, Chair of Urban Construction and Economy, Institute of Architecture, Construction and Design, Irkutsk National Research Technical University (83 Lermontova St., 664074 Irkutsk, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: V-3045-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7677-3187>, promteplo@yandex.ru

Tamara I. Shishelova, Professor, Chair of Physics, Irkutsk National Research Technical University (83 Lermontova St., 664074 Irkutsk, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: V-2981-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2372-8144>, tamara.shishelova@gmail.com

Evgeniy I. Smirnov, Postgraduate Student, Chair of Engineering Communications and Life Support Systems, Institute of Architecture, Construction and Design, Irkutsk National Research Technical University (83 Lermontova St., 664074 Irkutsk, Russia), ResearcherID: V-3117-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4999-7342>, jeka7.7.7@mail.ru

Contribution of the co-authors:

I. Yu. Shelekhov: analysing the literary data, scientific guidance, problem statement, data processing, article writing; T. I. Shishelova: analysing literary data, word processing and editing the text; E. I. Smirnov: analysing literature data, preparing samples, collecting and analysing analytical and practical materials, developing methods for conducting experiments, computer implementation of the problem solution.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.



Method of Relative Magnitudes for Calculating Magnetic Fluxes in Electrical Machine

O. A. Zakharzhevskii

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

zakol39@mail.ru

Introduction. The article presents the study results of the model of an asynchronous electric motor carried out by the author within the framework of the Priorities Research Program “Research and development in the priority areas of development of Russia’s scientific and technical complex for 2014–2020”.

Materials and Methods. A model of an idealized asynchronous machine (with sinusoidal distribution of magnetic induction in air gap) is used in vector control systems. It is impossible to create windings for this machine. The basis of the new calculation approach was the Conductivity of Teeth Contours Method, developed at the Electrical Machines Chair of the Moscow Power Engineering Institute (MPEI). Unlike this method, the author used not absolute values, but relative magnitudes of magnetic fluxes. This solution fundamentally improved the method’s capabilities. The relative magnitudes of the magnetic fluxes of the teeth contours do not required the additional consideration for exact structure of magnetic field of tooth and adjacent slots. These structures are identical for all the teeth of the machine and differ only in magnitude. The purpose of the calculations was not traditional harmonic analysis of magnetic induction distribution in air gap of machine, but a refinement of the equations of electric machine model. The vector control researchers used only the $\cos(\theta)$ function as a value of mutual magnetic coupling coefficient between the windings.

Results. The author has developed a way to take into account the design of the windings of a real machine by using imaginary measuring winding with the same winding design as a real phase winding. The imaginary winding can be placed in the position of any machine windings. The calculation of the relative magnetic fluxes of this winding helped to estimate the real values of the magnetic coupling coefficients between the windings, and find the correction functions for the model of an idealized machine. Modeling in the MATLAB showed that the refinement model of the idealized machine makes the electromagnetic processes similar to the processes of the real machine.

Discussion and Conclusions. The use of the proposed correction functions does not require the alteration of the vector control systems. The correction functions make the Park’s and Clark’s transformations more exact. The model of machine becomes more accurate and the processes taking place inside it coincide with real machine processes. The control of the electric machine becomes more precise.

Keywords: magnetic fluxes, calculating magnetic fluxes, electric machine, Clark’s and Park’s transformations, method of relative magnitudes

For citation: Zakharzhevskii O. A. Method of Relative Magnitudes for Calculating Magnetic Fluxes in Electrical Machine. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(1):62–76. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.062-076

Acknowledgements: The author thanks colleagues from the Institute of Electronics and Lighting Engineering of the National Research Mordovia State University for benevolence to the unusual author’s approaches used for the study of an asynchronous machine. The author expresses a special gratitude to V. V. Afonin for participating in the research as far as possible and for his help in MATLAB modeling.



Метод относительных величин для расчета магнитных потоков в электрических машинах

О. А. Захаржевский

ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

zakol39@mail.ru

Введение. Статья знакомит с результатами исследований модели асинхронного электродвигателя, выполненных автором в рамках целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы».

Материалы и методы. В системах векторного управления, как правило, используется модель идеализированной асинхронной машины (с синусоидальным распределением магнитной индукции в воздушном зазоре), изготовить обмотки которой не представляется возможным. Основой представленного в статье метода расчета стал метод проводимостей зубцовых контуров, разработанный на кафедре электрических машин ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»». В отличие от данного метода, в работе были использованы не абсолютные, а относительные величины магнитных потоков, что принципиально улучшило возможности метода. Для относительных величин не требуется дополнительное рассмотрение точной картины магнитного поля зубца и соседних пазов, поскольку данные картины для всех зубцов машины отличаются только величиной. Целью расчетов стал не традиционный гармонический анализ распределения магнитной индукции в воздушном зазоре машины, а уточнение уравнений модели электрической машины. Исследователи векторного управления использовали только функцию $\cos(\theta)$ как величину коэффициента взаимной магнитной связи между обмотками.

Результаты исследования. Был разработан способ учета конструкции обмоток реальной машины путем использования (воображаемой) измерительной обмотки, имеющей такую же конструкцию, что и реальная фазная обмотка. Расчет относительных магнитных потоков этой обмотки, которая может помещаться в позицию любой из обмоток машины, позволил рассчитать реальные величины коэффициентов магнитной связи обмоток и найти поправочные функции к модели идеализированной машины. Моделирование в MATLAB показало, что предложенное уточнение модели идеализированной машины делает электромагнитные процессы подобными процессам реальных машин.

Обсуждение и заключения. Важно, что применение предложенных поправочных функций не требует переработки созданных ранее систем векторного управления. Данные функции также уточняют преобразования Парка и Кларка. Модель электрической машины становится более точной, а процессы в ней – соответствующими процессам в реальной машине; появляются возможности для более верного управления электрической машиной.

Ключевые слова: магнитный поток, расчет магнитных потоков, электрическая машина, преобразования Парка и Кларка, метод относительных величин

Для цитирования: Захаржевский О. А. Метод относительных величин для расчета магнитных потоков в электрических машинах // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 1. С. 62–76. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.062-076

Благодарности: Автор благодарит коллег института электроники и светотехники ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» за доброжелательное отношение к необычным подходам автора в исследовании асинхронной машины. Особая благодарность В. В. Афонину за участие в исследованиях и постоянную помощь с задачами моделирования в MATLAB.

Introduction

The peculiarity of all electric machines is that when the current flows through the machine winding, the distribution of the magnetic induction in the air gap differs from the sinusoidal shape. That is why the most widespread method for studying processes in electric machine remains the method of harmonic analysis of the non-sinusoidal distribution of magnetic induction in the air gap of the machine. The disadvantage of this method is a usage of virtually the same model of an idealized electric machine, but only this model is used for each harmonic component separately.

In general, a three-phase electric machine is described by a system of nonlinear differential equations of the electric and magnetic circuits of the stator and the rotor for the instantaneous currents, voltages and magnetic flux linkages of the windings according to Kirchhoff's current and voltage laws, taking into account the rotation of the rotor with respect to the stator. For such spatial systems of equations A. Blondel has developed a method of two reactions in 1893 [1]. The effectiveness of the two reactions method is that it has helped to solve the system of nonlinear differential equations of a three-phase electric machine by converting it into simpler and more convenient for analysis two-phase system of equations. This method was improved by well-known scientists (R. H. Park [2], A. A. Gorev [3], E. Clarke¹). The method of two reactions is based on the transformations of vectors in linear space and corresponds to the cosine transformation of vectors. In fact, the method of two reactions uses the model of an idealized electric machine.

To achieve more dynamic and deep vector control of electric machine a model of an idealized machine is not enough,

and rather more accurate model of a real machine is required that corresponds to the distribution of magnetic induction in air gap according to the design of windings and of machine's magnetic system.

The author has developed a method to refine the model the parameters of idealized electric machine. In this article, the author has described his calculating method of magnetic fluxes of electrical machines, which serves as the basis for refinement of an idealized electric machine model. It is important for practice that the application of these correction functions in the drive control system does not require the alteration of the previously created control systems.

Literature review

As the basis for calculating the distribution of magnetic induction along the air gap of a real machine, the author has applied the Method of Conductivity of Teeth Contours (MCTC), developed at the Department of Electrical Machines of Moscow Power Engineering Institute (MPEI)¹ [2–3]. According to the MCTC, the phase winding of the machine was replaced by a set of windings ("teeth contours") creating the same distribution of magnetic induction in the air gap, as well as the distribution of original phase winding of the machine. In^{2–3}, the absolute values of the magnetic fluxes of the windings were used. Then obtained magnetic induction distributions were subjected to traditional harmonic analysis for the study of electromechanical processes.

In general, a three-phase electric machine is described by a system of nonlinear differential equations of the electric and magnetic circuits of the stator and rotor for the instantaneous currents, voltages and magnetic flux linkages of windings according to Kirchhoff's current and voltage laws, taking into account the rotation of the rotor with respect to the sta-

¹ Clarke E. Circuit analysis of A-C power systems. New York : J. Wiley & Sons; 1943.

² Ivanov-Smolenskiy A. V. [Electrical machinery]. Moscow : Moscow Power Engineering Institute Publ.; 2006. Vol. 2. (In Russ.)

³ Ivanov-Smolenskiy A. V., Abramkin Yu. V., Vlasov A. I., Kuznetsov V. A. A universal method for calculating electromagnetic processes in electrical machines. Moscow : Energoatomizdat; 1986. (In Russ.)



tor⁴⁻¹¹ [4–7]. The intermediate values between the currents of the windings are the magnetic flux linkages of the windings. The magnetic coupling is created by the design of the windings and the magnetic system and demonstrated in the equation as mutual inductances between the windings.

All the mutual inductances between the windings are function of the electric angle of the rotor rotation with respect to the stator. This function is different for various types of windings⁴⁻⁷. So machines with different winding design will react differently to the same control method, when the power supplies made one the same impact on stator windings. The fact, now only one model of an idealized asynchronous machine is used in electric drive control and during the process of modeling. It shows that there is a necessity to take into account the design of the real machine windings.

The calculating method of magnetic fields of electric machines was thoroughly described in the work⁵. In this work, the concept of Winding Function Theory (WFT) was introduced for the first time and the method of its application was described. The basis of the WFT was the law of total current, Ampere's law and Gauss's theorem, studied in the discipline the theoretical bases of electrical engineering. In this work, an example of the calculation for the WFT was given and it was pointed out the difference of windings functions for various types of windings. The usage

of the Fourier series (harmonic analysis) for describing the non-sinusoidal distribution of magnetic induction in the air gap of an electric machine has been proposed for the universal application of the WFT in the work⁵, and was made the concept of mutual magnetic conductivity between windings. There also introduced the concept of an idealized electric machine (for each of the harmonics separately).

The method of the WFT is widely used by developers of vector control systems of electrical machines⁸⁻¹⁰ [4; 8]. The WFT developers offer various versions of integral expressions for calculating the absolute value of the magnetic flux of winding or the inductance of winding of particular electrical machine. In these integral expressions, spatial functions were applied for the mutual magnetic conductivity between the windings. These spatial functions are unknown in advance, and at the same time they depend on the angle of the rotor rotation with respect to the stator. It is very difficult to use the proposed algorithms in the model of an electric machine and in the control system of the electric drive.

Some researchers have supposed to use the correction functions to the mutual inductances between windings in the model of an asynchronous machine¹² [8]. These correction functions were not obtained in complete form. Therefore, the WFT remained in the algorithms form of calculating mutual magnetic fluxes for each

⁴ Kopylov I. P. [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow : Higher School Publ.; 2001. (In Russ.)

⁵ Schmitz N. L., Novotny D. W. Introductory electromechanics. New York : J. Wiley & Sons; 1965.

⁶ Boldea I., Nasar S. A. The induction machine handbook. Boca Raton : CRC Press; 2002.

⁷ Riaz M. Simulation of electric machine and drive systems using MATLAB and SIMULINK. University of Minnesota, Department of Electrical and Computer Engineering. Available at: <http://people.ece.umn.edu/users/riaz>

⁸ Joksimovic G., Riger J., Wolbank T., Peric N., Vasak M., Stojic G., Lesic V. Dynamic induction machine model accounting for stator and rotor slotting. In: Twentieth International Conference on Electrical Machines. Marseille: 2002; 207–213.

⁹ Robyns B., Francois B., Degobert P., Hautier J. P. Vector control of induction machines. London : Springer; 2012.

¹⁰ Pillay P., Levin V. Mathematical models for induction machines. In: Industry Applications Conference, 1995. DOI: 10.1109/IAS.1995.530355

¹¹ Zakharzhevskii O. A. [About model of asynchronous machine]. Moscow : Viniti; 2013. Paper no. 122-B. (In Russ.)

¹² DOI: 10.1109/IAS.1995.530355

particular electric machine. The usage of the model of an idealized electric machine continues in the WFT.

Methods of the Winding Field Theory have been started to use for calculating of the magnetic fields of electric machines as the first electronic computers had been invented^{13–17} [2–3]. To simulate the machine's magnetic field, various mathematical methods were used – the finite element method, the grid method, the conformal mappings method, discrete electrical models equivalent to the machine's magnetic field. The use of computer programs of magnetic fields modeling in the WFT did not give generalized mathematical expressions for the refinement of the electric machine model^{18–19} [9–10]. These techniques have given a useful result for particular electrical machine.

The scientists of the Department of Electrical Machines of Moscow Power Engineering Institute (MPEI) have created the MCTC for calculating the magnetic fluxes of electric machine during the appearance of semiconductor converters for the control of electric machine [2–4]. With reference to the MCTC, they have mastered the methods of modeling for the control of electric machine and new computer methods for calculating magnetic fields.

The information search has showed that at present the research is being conducted in the direction of refinement of the electric machine model according to the design of the windings of the real electric machine.

Materials and Methods

The basic processes in the mathematical model of a three-phase asynchronous machine were described by the equations of mutual inductive coupling between three phase windings of the stator and three phase windings of the rotor^{13–17; 20–21} [1–4]. In order for the reader to understand the meaning of calculating the parameters of the model of an asynchronous machine, its system of equations has given below. It connected the voltages and currents of all phase windings.

In the text below: instantaneous values of voltages u , currents i and flux linkages of windings Ψ , active resistances of windings R , inductance L and mutual inductances between windings M . The indices of the quantities have shown the belonging to the stator windings of phases A , B and C or to the windings of the phase rotor a , b and c . For example, u_a has the instantaneous voltage value of phase a rotor; M_{Bc} – mutual inductance between the winding of the phase B of the stator and the winding of the phase c of the rotor. The matrices of the corresponding quantities were enclosed in a square brackets, the superscript D of the matrices has shown that the matrix is diagonal.

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \\ u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_A \\ R_B \\ R_C \\ R_a \\ R_b \\ R_c \end{bmatrix}^D \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + d \begin{bmatrix} \Psi_{AS} \\ \Psi_{BS} \\ \Psi_{CS} \\ \Psi_{aR} \\ \Psi_{bR} \\ \Psi_{cR} \end{bmatrix} / di;$$

¹³ Clarke E. Circuit analysis of A-C power systems.

¹⁴ Ivanov-Smolenskiy A. V. [Electrical machinery].

¹⁵ Ivanov-Smolenskiy A. V., Abramkin Yu. V., Vlasov A. I., Kuznetsov V. A. A universal method for calculating electromagnetic processes in electrical machines.

¹⁶ Kopylov I. P. [Mathematical modeling of electrical machines].

¹⁷ Schmitz N. L., Novotny D. W. Introductory electromechanics.

¹⁸ Schumann C., Müller T., Stein E., Pacas M. Analytical calculation of the induced EMF in PM-machines with arbitrary arranged surface mounted magnets using the winding function theory. In: Proceedings of the 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM); 994–1000. DOI: 10.1109/ICELMACH.2014.6960302

¹⁹ Igelspacher J., Hecker Q., Herzog H.-G. Simulation of an axial-flux induction machine with squirrel cage based on the winding function theory. In: Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion. 2012; 1–6. DOI: 10.1109/ESARS.2012.6387428

²⁰ Boldea I., Nasar S. A. The induction machine handbook.

²¹ Available at: <http://people.ece.umn.edu/users/riaz>



$$\begin{bmatrix} \Psi_{AS} \\ \Psi_{BS} \\ \Psi_{CS} \\ \Psi_{aR} \\ \Psi_{bR} \\ \Psi_{cR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{AA} & M_{AB} & M_{AC} & M_{Aa} & M_{Ab} & M_{Ac} \\ M_{BA} & L_{BB} & M_{BC} & M_{Ba} & M_{Bb} & M_{Bc} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_{CC} & M_{Ca} & M_{Cb} & M_{Cc} \\ M_{aA} & M_{aB} & M_{aC} & L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{bA} & M_{bB} & M_{bC} & M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{cA} & M_{cB} & M_{cC} & M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

During the research, the author found that the more universal parameter of the electric machine model than the mutual inductance between the windings has the dimensionless coefficient of mutual magnetic coupling between the windings. In the analysis of vector control, the condition of symmetry of the phases of the machine has applied, as well as bringing the rotor windings to the electric circuit of the stator. As a result, the magnetic coupling equation of the windings in (1) has taken the form:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{AS} \\ \Psi_{BS} \\ \Psi_{CS} \\ \Psi_{aR} \\ \Psi_{bR} \\ \Psi_{cR} \end{bmatrix} = L_m \cdot \begin{bmatrix} (k_{AA} + m_s) k_{AB} k_{AC} k_{Aa} k_{Ab} k_{Ac} \\ k_{BA} (k_{BB} + m_s) k_{BC} k_{Ba} k_{Bb} k_{Bc} \\ k_{CA} k_{CB} (k_{CC} + m_s) k_{Ca} k_{Cb} k_{Cc} \\ k_{aA} k_{aB} k_{aC} (k_{aa} + m_r) k_{ab} k_{ac} \\ k_{bA} k_{bB} k_{bC} k_{ba} (k_{bb} + m_r) k_{bc} \\ k_{cA} k_{cB} k_{cC} k_{ca} k_{cb} (k_{cc} + m_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Here, the quantities known in the electric machine model were used: the magnetization inductance L_m , the magnetic scattering coefficients of the stator m_s and the rotor m_r [2–5]. If only one of the windings is the source of magnetic field of machine, for example, the winding of the phase A stator with current i_A , then equation (2) could be simplified in this way:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{A1} \\ \Psi_{B1} \\ \Psi_{C1} \\ \Psi_{a1} \\ \Psi_{b1} \\ \Psi_{c1} \end{bmatrix} = L_m \cdot \begin{bmatrix} (k_{AA} + m_s) \\ k_{BA} \\ k_{CA} \\ k_{aA} \\ k_{bA} \\ k_{cA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = L_m i_A \cdot \begin{bmatrix} km_{AS} \\ k_{BA} \\ k_{CA} \\ k_{aA} \\ k_{bA} \\ k_{cA} \end{bmatrix} \quad (3)$$

The magnetic flux linkages of all the windings were present here, for example, the magnetic flux linkage of the phase B stator: $\Psi_{B1} = L_m \cdot i_A \cdot k_{BA}$; magnetic flux linkage of the phase A rotor: $\Psi_{a1} = L_m \cdot i_A \cdot k_{aA}$. Added index “unit” in the indices of the magnetic flux linkages indicates that these ratios have related to the current power mode with only one phase A stator winding.

Feature (3) was the equality for the magnetic flux linkage of the winding of the phase A stator:

$$\begin{aligned} \Psi_{A1} &= L_m \cdot i_A \cdot (k_{AA} + m_s) = L_m \cdot i_A \cdot k_{AA} + \\ &+ L_m \cdot i_A \cdot m_s = \Psi_A + \Psi_{Ams} \end{aligned} \quad (4)$$

This ratio has showed that in the air gap of the machine only a part of Ψ_A was left from the total magnetic flux linkage $\Psi_{AS} = \Psi_{A1}$ of the winding of the phase A stator, the current of which i_A was created a magnetic flux in the air gap of the machine. The other part of the magnetic flux, the magnetic flux leakage of the winding of phase A stator did not enter the air gap of the machine, it was formed as the magnetic flux leakage Ψ_{Ams} of the winding of phase A stator, it was created by the end parts of the winding that did not participate in the formation of the magnetic flux in air gap of machine.

By definition of the concept, the magnetic flux linkage of the stator phase A winding on air gap has equal to $\Psi_A = L_m \cdot i_A$, and the coefficient of magnetic flux linkage of the winding of phase A stator has equal $k_{AA} = 1 = L_m \cdot i_A \cdot k_{AA} / \Psi_A = L_m \cdot i_A \cdot k_{AA} / (L_m \cdot i_A \cdot 1)$ (only for a magnetic flux in the air gap!).

All the mutual flux linkages of the other windings were received a part of the full flux linkage Ψ_A , created in the air gap of the machine. In this case, for example, the ratio – $\Psi_{B1} / \Psi_A = L_m \cdot i_A \cdot k_{BA} / L_m \cdot i_A \cdot k_{AA} = k_{BA} / k_{AA} = k_{BA}$ was the mutual magnetic coupling coefficient between the windings of the phase A stator and the phase B stator.

Results

The result of the author's research was the method of calculating in Relative Magnitudes of Magnetic Fluxes (RMMF). The magnetic field of the electric machine was created by the currents of all the windings. The current of only one winding of the phases A of the stator i_A creates the distribution of the magnetic induction $B(\theta)$ in the air gap in accordance with the design of this winding. The magnetic induction $B(\theta)$ was formed by the currents of all N ($n \in N$) sections of the phase A winding. The magnetic induction $B_n(\theta)$ in the air gap above the individual tooth, created by the current of the only n -th section of the phase winding, was calculated from the value of the current i_n in this section, the number of turns in this section w_n and the air gap double size δ according to the MCTC technique²²⁻²³ or similarly by the procedure of²⁵:

$$B_n = (w_n \cdot i_n \cdot \mu_0) / 2\delta. \quad (5)$$

Here, μ_0 is the magnetic permeability of air. The product $w_{n(z)} \cdot i_{n(z)} = f_{z(n)}$ has the magnetomotive force (MMF) created in only the z -th tooth contour by the current of the n -th section, which is located in the space of the z -th tooth. MMF of the entire z -th tooth contour f_z was equal to the sum of the MMF $f_{z(n)}$ of all phase winding sections that were located in the space of the z -th tooth contour. When manufacturing electric machine, the number of turns in the sections $w_{n(z)}$ is usually made the same for all sections of the stator windings (or for all sections of the rotor windings). When the sections are connected in series, the same current $i_n = i_A$ has flowed through them. For the linear model of the AM magnetic system, the shape of the distribution of magnetic induction along the air gap

was not depend on the magnitude of the phase winding current, it was determined by the arrangement of the sections of phase winding along the slots²²⁻²⁶, if the saturation phenomenon in the magnetic system is not taken into account.

Therefore, it could to be assumed that in each section the number of turns was equal to one turn ($w_n = 1$), since this does not change the form of the distribution of magnetic induction in the air gap. In this case, the conventional number of turns of the tooth contour w_{zN} could be defined as the number of phase winding sections that were placed in the space of a given z -th tooth contour. According to the foregoing, the MMF of the tooth contour was equal:

$$f_z = w_{n(z)} \cdot i_{n(z)} \cdot \sum_{n=1}^{zN} 1 = 1 \cdot i_{n(z)} \cdot w_{zN}. \quad (6)$$

The magnetic induction in the air gap directly above the tooth was equal [5–8]:

$$\begin{aligned} B_{zN} &= f_z \cdot \mu_0 / 2\delta = \\ &= i_n \cdot w_{zN} \cdot \mu_0 / 2\delta = \\ &= (i_n \cdot \mu_0 / 2\delta) \cdot w_{zN}. \end{aligned} \quad (7)$$

The magnetic flux of the z -th tooth contour Φ_z was determined according to [5–8] by the integral the real magnetic induction $B_z(\theta_R)$ over the area of the air gap for the tooth and its adjacent slot along the arc of the circle with arc length $r_R \cdot \Delta\theta_{zR}$:

$$\begin{aligned} \Phi_z &= \int_{z-l}^z B_z(\theta_R) \cdot l_R \cdot r_R \cdot d\theta_R = \\ &= l_R \cdot r_R \cdot \int_{z-l}^z B_z(\theta_R) \cdot d\theta_R = \\ &= (l_R \cdot r_R \cdot \Delta\theta_{zR}) \cdot B_{zN} \cdot \\ &\cdot \int_{z-l}^z \{(B_z(\theta_R) / B_{zN}) \cdot d\theta_R\} / \Delta\theta_{zR} = \\ &= S_R \cdot B_{zN} \cdot k_{zB}. \end{aligned} \quad (8)$$

²² Ivanov-Smolenskiy A. V. [Electrical machinery].

²³ Ivanov-Smolenskiy A. V., Abramkin Yu. V., Vlasov A. I., Kuznetsov V. A. A universal method for calculating electromagnetic processes in electrical machines.

²⁴ Schmitz N. L., Novotny D. W. Introductory electromechanics.

²⁵ Kopylov I. P. [Mathematical modeling of electrical machines].

²⁶ Boldea I., Nasar S. A. The induction machine handbook.



The length of the active part of the rotor winding l_R and the average radius of the air gap r_R were constant values for AM, and they could be derived beyond the integral sign. Here were denoted: $\Delta\theta_{zR}$ – the angle (electric) of the rotation of rotor by one tooth and the adjacent slot; k_{zB} was the coefficient of averaging the value of magnetic induction over the tooth space.

The coefficient k_{zB} has connected the magnitude (maximum) of the magnetic induction B_{zN} over the z -th tooth with the average value of magnetic induction B_{zm} in the space of this tooth and its adjacent slot.

The average value of magnetic induction along the arc of the z -th tooth and its adjacent slot was equal:

$$B_{zm} = B_{zN} \cdot k_{zB} = (i_n \cdot \mu_0 / 2\delta) \cdot w_{zN} \cdot k_{zB}. \quad (9)$$

In the linear model of the magnetic circuit AM, the distribution of magnetic induction $B_z(\theta_R)$ in the space of any tooth and its adjacent slot has the same in shape for all the teeth and was proportional to the maximum value of magnetic induction B_{zN} over this tooth. The coefficient of averaging of magnetic induction in the space of the tooth k_{zB} was a constant value for all the teeth of stator of this machine.

The magnetic flux Φ_z of the z -th tooth contour was equal to the product of the average value of magnetic induction B_{zm} by the area of tooth and its adjacent slot ($S_z = l_R \cdot r_R \cdot \Delta\theta_{zR}$) in the air gap AM:

$$\Phi_z = B_{zm} \cdot S_z =$$

$$= \{(i_n \cdot \mu_0 \cdot k_{zB} / 2\delta) \cdot w_{zN}\} \cdot S_z. \quad (10)$$

The magnetic flux linkage Ψ_z of each of the tooth contour has formed by the interaction of the magnetic flux Φ_z of the z -th tooth with all turns w_{zN} of this z -th tooth contour, i.e. the magnetic flux linkage Ψ_z of the tooth contour was proportional to the square of the conventional number of turns of this tooth contour w_{zN} :

$$\Psi_z = \Phi_z \cdot w_{zN} =$$

$$= (i_n \cdot S_z \cdot \mu_0 \cdot k_{zB} / 2\delta) \cdot w_{zN}^2. \quad (11)$$

Fig. 1 has shown (in relative units) the distribution of MMF along teeth contours along the air gap AM, created by the winding current of phase A stator of the type two-period with a shortened pitch ($Z = 36$, $y = 7$, $\tau = 9$, $2p = 4$) (here only 18 of the 36 slots are shown).

The column on the right has indicated the positions (relative to the teeth) of the sections n1, n2, n3 of the positive pole and below – the negative pole of phase winding of phase A stator.

The symbols M1, M2, M3 has shown the location (relative to the teeth) of sections of measuring winding when it is displaced here by an (electric) angle $\theta = 120^\circ$ with respect to the phase A winding.

As the unit of magnetic flux, it has useful to determine the magnetic flux of

36	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	z
1	2	3	3	3	3	3	3	2	1										w_{zN}
-1										-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-1	
			1	1	1	1	1	1	1										n 3
			1	1	1	1	1	1	1										n 2
		1	1	1	1	1	1	1											n 1
-1										-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1			-n 1
											-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1		-n 2
												-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-n 3
																			M1
																			M2
																			M3
							1w	2w	3w	3w	3w	3w	3w	2w	1w				
360	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	θ°

Fig. 1. Distribution of MMF of phase A winding along the teeth contours

tooth contour with one turn ($w_n = 1$) and with a current of 1 A ($i_n = 1$ A):

$$\begin{aligned}\Phi_{zn0} &= B_{zm} \cdot S_z = \\ &= (i_n \cdot S_z \cdot \mu_0 \cdot k_{zB} / 2\delta) \cdot w_n = \\ &= (i_n \cdot S_z \cdot \mu_0 \cdot k_{zB} / 2\delta) \cdot w_n = \\ &= (1 \cdot S_z \cdot \mu_0 \cdot k_{zB} / 2\delta) \cdot 1 = \\ &= S_z \mu_0 k_{zB} / 2\delta.\end{aligned}\quad (12)$$

The unit of magnetic flux linkage of the same tooth contour (for $w_n = 1$ and $i_n = 1$ A) was equal to:

$$\begin{aligned}\Psi_{zn0} &= \Phi_{zn0} w_n = \\ &= (i_n S_z \mu_0 k_{zB} / 2\delta) w_n^2 = \\ &= (1 \cdot S_z \mu_0 k_{zB} / 2\delta) \cdot 1^2 = \\ &= S_z \mu_0 k_{zB} / 2\delta.\end{aligned}\quad (13)$$

The calculations made above contain a useful evaluation of the design of AM windings:

$$(S_z \mu_0 k_{zB} / 2\delta) = \text{const} = C_W. \quad (14)$$

The magnetic flux Φ_z of the z -th tooth contour was recorded as follows:

$$\begin{aligned}\Phi_z &= B_{zm} \cdot S_z = \\ &= (i_n \mu_0 k_{zB} / 2\delta) \cdot w_{zN} \cdot S_z = \\ &= i_n \cdot (S_z \mu_0 k_{zB} / 2\delta) \cdot w_{zN} = \\ &= i_n \cdot C_W \cdot w_{zN}.\end{aligned}\quad (15)$$

Now the magnetic flux of the tooth contour Φ_z^* was equal (in relative units):

$$\begin{aligned}\Phi_z^* &= \frac{\Phi_z}{\Phi_{zn0}} = \frac{(i_n S_z \mu_0 k_{zB} / 2\delta) \cdot w_{zN}}{(i_n S_z \mu_0 k_{zB} / 2\delta)} = \\ &= \frac{i_n \cdot C_W}{i_n \cdot C_W} \cdot w_{zN} = w_{zN}.\end{aligned}\quad (16)$$

The magnetic flux linkage of the z -th tooth contour in relative units was equal:

$$\begin{aligned}\Psi_z^* &= (i_n S_z \mu_0 k_{zB} / 2\delta) \cdot \\ &\cdot w_{zN}^2 / (i_n S_z \mu_0 k_{zB} / 2\delta) = w_{zN}^2.\end{aligned}\quad (17)$$

The relative magnetic flux linkage (for the component in the air gap) of the self-

induction of winding of phase A stator Ψ_A^* was equal to the sum of relative flux linkages Ψ_z^* of all the teeth contours in the space of one pole of the phase A winding:

$$\Psi_A^* = \sum_{z=1}^{Z/2p} \Psi_z^* = \sum_{z=1}^{z1} w_{zN}^2. \quad (18)$$

To calculate the mutual magnetic fluxes, the author has suggested using such a technique. An (imaginary) measuring winding consisting of the same teeth contours as the phase winding has introduced into the air gap AM (fig. 1). It has contained the same set of conventional turns (w_{zNM}) of teeth contours.

As a result, the relative magnetic flux linkage of the z_M -th tooth contour of the measuring winding Ψ_{zM}^* was equal to the product of the conventional number of turns w_{zN} for the tooth contour of the phase winding (fixed) by the conventional number of turns w_{zNM} for the tooth contour of the measuring winding (movable) when both these teeth contours have opposite each other in the space of the machine:

$$\Psi_{zM}^* = w_{zN} \cdot w_{zNM}. \quad (19)$$

The magnetic flux linkage for the entire measuring winding was equal to the sum of the relative magnetic flux linkages of all teeth contours of one pole of the measuring winding:

$$\Psi_M^*(\theta) = \sum_{zM=1}^{Z/2p} \Psi_{zM}^* = \sum_{zM=1}^{Z/2p} w_{zN}(\theta) \cdot w_{zNM}(\theta). \quad (20)$$

With an offset angle $\theta = 0^\circ$, the location of the measuring winding has coincided with the location of the winding of phase A stator. Thus, the magnetic flux linkage of measuring winding became equal to the magnetic flux linkage of the self-inductance of winding of phase A stator (without considering the magnetic flux leakage of the phase A winding):

$$\Psi_M^*(0^\circ) = \Psi_A^* = \sum_{zM=1}^{z1} w_{zN} \cdot w_{zNM} = \sum_{zM=1}^{z1} w_{zN}^2. \quad (21)$$

If the measuring winding is shifted (see fig. 1) from the position of



winding of phase A stator to the angle $\theta = -2\pi/3$ (-120° el.), then the measuring winding has taken the position of winding of phase B stator. In this case, the ratio of the magnetic flux linkage of measuring winding $\Psi_M^*(-120^\circ)$ to the magnetic flux linkage of the phase A winding $\Psi_A^* = \Psi_M^*(0^\circ)$ was equal to the mutual magnetic coupling coefficient $k_{MA}(-120^\circ)$ between the windings of phase B stator and the phase A stator. The results of calculations for the formulas given above were concentrated in table 1.

In table 1, the mutual magnetic flux linkages of the winding of phase A stator with the measuring winding were calculated for the phase A winding of the two-

period type with a shortened pitch ($Z = 36$, $y = 7$, $\tau = 9$, $2p = 4$) for the displacement angles $\theta = 0^\circ$ and $\theta = -120^\circ$. This made it possible to calculate the mutual magnetic coupling coefficient between the winding of phase B stator and the winding of phase A stator k_{BA} :

$$k_{BA} = \Psi_M^*(-120^\circ) / \Psi_M^*(0^\circ) = \\ = \Psi_B^* / \Psi_A^* = -26 / 55 = -0,4727.$$

The results of calculations of the mutual magnetic coupling coefficients between the winding of phase A stator and the measuring winding for different angles of displacement between these windings were given in table 2. These calculations were performed similarly to the

Table 1

Calculation of mutual magnetic flux linkages for a two-period winding with a shortened pitch ($Z = 36$, $y = 7$, $\tau = 9$, $2p = 4$)

TC	f_z	f_z	W_{zN}	Ψ_{zN}^*	Ψ_A^*	Φ_{zN}^*	W_{zNM}	Ψ_{zM}^*	Ψ_M^*	θ°
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	$f_{z1} = 1 \cdot i_{A1} \cdot w_n$	1	1	1	+1	1				0
2	$f_{z2} = 2 \cdot i_{A1} \cdot w_n$	2	2	4	+4	2				20
3	$f_{z3} = 3 \cdot i_{A1} \cdot w_n$	3	3	9	+9	3				40
4	$f_{z4} = 3 \cdot i_{A1} \cdot w_n$	3	3	9	+9	3				60
5	$f_{z5} = 3 \cdot i_{A1} \cdot w_n$	3	3	9	+9	3				80
6	$f_{z6} = 3 \cdot i_{A1} \cdot w_n$	3	3	9	+9	3				100
7	$f_{z7} = 3 \cdot i_{A1} \cdot w_n$	3	3	9	+9	3	1	$3 \cdot 1 = 3$	+3	120
8	$f_{z8} = 2 \cdot i_{A1} \cdot w_n$	2	2	4	+4	2	2	$2 \cdot 2 = 4$	+4	140
9	$f_{z9} = 1 \cdot i_{A1} \cdot w_n$	1	1	1	+1	1	3	$1 \cdot 3 = 3$	+3	160
10	$f_{z10} = -1 \cdot i_{A1} \cdot w_n$	-1	1	-1	= Σ	-1	3	$-1 \cdot 3 = -3$	-3	180
11	$f_{z11} = -2 \cdot i_{A1} \cdot w_n$	-2	2	-4	+55	-2	3	$-2 \cdot 3 = -6$	-6	200
12	$f_{z12} = -3 \cdot i_{A1} \cdot w_n$	-3	3	-9		-3	3	$-3 \cdot 3 = -9$	-9	220
13	$f_{z13} = -3 \cdot i_{A1} \cdot w_n$	-3	3	-9		-3	3	$-3 \cdot 3 = -9$	-9	240
14	$f_{z14} = -3 \cdot i_{A1} \cdot w_n$	-3	3	-9		-3	2	$-3 \cdot 2 = -6$	-6	260
15	$f_{z15} = -3 \cdot i_{A1} \cdot w_n$	-3	3	-9		-3	1	$-3 \cdot 1 = -3$	-3	280

End of table 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
16	$f_{z16} = -3 \cdot i_{A1} \cdot w_n$	-3	3	-9		-3			$= \Sigma$	300
17	$f_{z17} = -2 \cdot i_{A1} \cdot w_n$	-2	2	-4		-2			-26	320
18	$f_{z18} = -1 \cdot i_{A1} \cdot w_n$	-1	1	-1		-1				360
19	$f_{z19} = 1 \cdot i_{A1} \cdot w_n$	1	1	1		1				0

Note: the designations of the values (relative units): TC – № z -th tooth contour of phase winding; f_z – MMF of z -th tooth contour of phase winding; W_{ZN} – the conventional number of turns of z -th tooth contour of phase winding; $\Psi_{zN}^* = f_z$ – flux linkage of z -th tooth contour of phase winding; Ψ_A^* – flux linkage of phase winding ($\theta = 0^\circ$); Φ_{zN}^* – flux of z -th tooth contour of phase winding; W_{zNM} – the conventional number of turns of z_M -th tooth contour of measuring winding; Ψ_{zM}^* – flux linkage of z_M -th tooth contour of measuring winding; $\Psi_B^* = \Psi_M^* (-120^\circ)$ – flux linkage of measuring winding; θ – electric angular displacement relative to the winding of phase A of the stator.

calculations in table 1 for the same type of a two-period winding with a shortened pitch ($Z = 36, y = 7, \tau = 9, 2p = 4$).

In the model of an idealized AM, the coefficients of the mutual magnetic coupling between any windings were calculated through the function $\cos(\Delta\theta)$. Angle $\Delta\theta$ has the electric angle of shear between the positions of the windings. The coefficient of mutual magnetic coupling of the windings of phase B and phase A in the model of ideal AM was $\cos(120^\circ) = -0.5$. This just has indicated that the idealized AM model has used!

The author has proposed to use the ratio $k_{MA}(\theta) / \cos(\theta) = K A a(\theta)$ as the main correction function (MCF) to the idealized AM model. The results of calculations of main correction function were shown in table 2.

If the coefficient of mutual magnetic coupling in the idealized AM model $\cos(\theta)$ is multiplied by the main correction function $K A a(\theta)$ for the type of winding used, the mutual magnetic coupling coefficient $k_{MA}(\theta)$ was obtained, which has taken into account the winding type AM:

$$\cos(\theta) \cdot K A a(\theta) = k_{MA}(\theta). \quad (22)$$

The magnetic flux passes from the stator magnetic circuit through the air gap to the magnetic circuit of the rotor. Thus, it is possible to use the ratio $k_{MA}(\theta)$ as the ratio

of the magnetic flux linkage of winding of phase a rotor to the magnetic flux linkage of winding of phase A stator:

$$\Psi_{Aa}^*(\theta) = \Psi_a^*(\theta) / \Psi_A^*(0^\circ) = k_{MA}(\theta). \quad (23)$$

Table 2

Calculations of $K A a(\theta)$

TC	θ°	$\Psi_M^*(\theta)$	$k_{MA}(\theta)$	$\cos(\theta)$	$K A a(\theta)$
1	0	+55	1,000	1,000	1,000
2	20	+51	0,927	0,940	0,987
3	40	+41	0,745	0,766	0,973
4	60	+26	0,473	0,5	0,946
5	80	+9	0,164	0,174	0,943
6	100	-9	-0,164	-0,174	0,943
7	120	-26	-0,473	-0,500	0,946
8	140	-41	-0,745	-0,766	0,973
9	160	-51	-0,927	-0,940	0,987
10	180	-55	-1,000	-1,000	1,000

Note: the designations of the values (relative units): TC – № z -th tooth contour of phase winding; θ° – angle displacement between the measuring winding and the windings of the phase A stator; $\Psi_M^*(\theta)$ flux linkage of the measuring winding.; $k_{MA}(\theta) = \Psi_M^*(\theta) / \Psi_A^*(0)$ – the mutual magnetic coupling coefficient between the windings of phase A stator and the measuring winding; $K A a(\theta) = k_{MA}(\theta) / \cos(\theta)$ – the main correction function



The measuring winding could now be placed in the position of any of the windings of rotor. The ratio of the magnetic flux linkage of measuring winding to the magnetic flux linkage of phase winding was the coefficient of mutual magnetic coupling $k_{MA}(\theta)$ between these windings, which has taken into account the type of windings AM:

$$k_{MA}(\theta) = \Psi_M^*(\theta) / \Psi_M^*(0) = \Psi_M^*(\theta) / \Psi_A^*. \quad (24)$$

The method of calculating the relative magnitudes of the magnetic fluxes of electrical machines shown in tables 1 and 2 was the essence of the RMMB method. The RMMF method has based on the same assumptions regarding the design of windings and the AM magnetic system, as well as harmonic analysis method, as MCTC and as WFT. The values of the correction function $Ka(\theta)$ for the displacement angles $\theta = 2\pi / 3$ (and $\theta = 4\pi / 3$) were the correction factors $KSS = KAB = KAC = KCA = KCB = KCB = Ka(120^\circ) = 0.946$, for example, for the elements of the matrix $[L_{IK}]$ of mutual inductances between stator windings in the equations of the idealized AM model that lead to the values of these matrix elements already for real AM:

$$[L_{IK}] = L_m \begin{bmatrix} (1+k_{i\sigma}), (-0,5 \cdot KAB), (-0,5 \cdot KAC); \\ (-0,5 \cdot KBA), (1+k_{i\sigma}), (-0,5 \cdot KBC); \\ (-0,5 \cdot KCA), (-0,5 \cdot KCB), (1+k_{i\sigma}) \end{bmatrix}. \quad (25)$$

For the winding of the template type ($Z = 24, p = 2, q = 4, \tau = 12, y = 10$), the calculated correction factors were equal to $KSS = 0.889$. For the two-layer winding with $Z = 24, p = 4, q = 2$, the calculated correction factors were equal to $KSS = 0.842$. For a two-period winding with a shorter pitch ($Z = 36, y = 7, \tau = 9, 2p = 4$), these correction factors were equal to $KSS = 0.946$.

The latter type of winding has the best distribution of magnetic induction among the analyzed types of windings (almost sinusoidal form). For this type

of winding, simulations in MATLAB has compared the processes of direct AM start from the 60 Hz network for the idealized AM model and for the modified AM model [11].

Fig. 2 has shown the graph of simulation in MATLAB of direct AM start for the model of idealized AM. Fig. 3 has shown the start-up schedule in the same mode of the same (modified) AM, in the model of which the correction factors $KSS = 0.946$ were introduced into the mutual inductance matrix between the stator windings and $KRR = 0.946$ between the rotor windings.

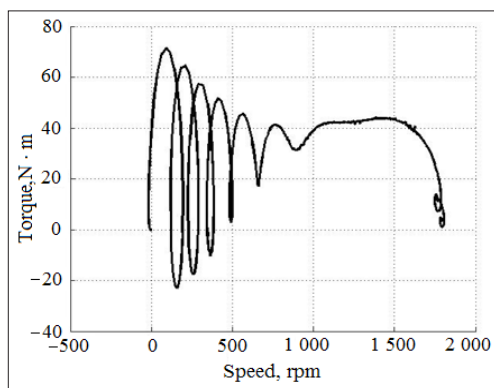


Fig. 2. Torque – speed (ideal AM model)

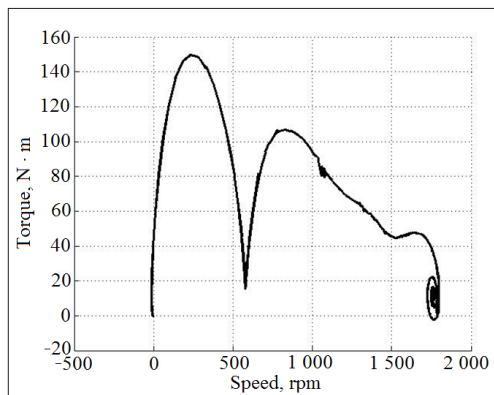


Fig. 3. Torque – speed (modified AM model)

The torque form of the modified AM model (fig. 3) was larger and more stable during the machine acceleration compared with the model of idealized AM (fig. 2). In the graph of fig. 2, during the

machine acceleration a braking and acceleration loops were observed, which could be difficult to explain with any some physical processes in AM, but which have observed with all idealized AM model in modeling.

In the graph of fig. 3, the start-up process corresponded to real processes. Comparison of graphs have showed the utility of accounting for the design of windings in the AM model.

The refinement of the AM model was achieved thanks to the application of the method of calculating magnetic fluxes for electric machines – the RVMF method.

Discussion and Conclusions

To calculate the absolute values of the magnetic fluxes of an electric machine, many methods have been developed that at the same time have weakly reflected the type of AM windings, have little affect the model of the machine^{27–33} [9–14]. The RMMF method, in contrast to other methods, provided a refinement of the AM model according to the type of its windings by means of correction functions³⁴ [5–7; 11].

The need to refine the AM model using the deviation of the distribution of magnetic induction in the air gap AM from the sinusoidal form existed for a long time [4; 8; 15–16]. This has confirmed by the experience of using the method of harmonic analysis. The task to refine the AM model become obvious after the appearance of various variants of AM vector control velocity where the idealized model AM^{35–40} was used [4; 8]. However, a deeper and more dynamic AM control required a more accurate AM model [4–7; 8; 11; 15–16]. The RMMF method has specifically designed to calculate the correction functions and correction factors for the idealized AM model in order to obtain a model of real AM [5–7; 11].

Distinctive features of the RMMF method:

- calculation of the distribution of magnetic induction in the air gap along the teeth contours;
- determination of the magnetic flux of the single-turn of tooth contour as a unit of magnetic flux;

²⁷ Igelspacher J., Hecker Q., Herzog H.-G. Simulation of an axial-flux induction machine with squirrel cage based on the winding function theory. In: *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*. 2012; 1–6. DOI: 10.1109/ESARS.2012.6387428

²⁸ Hecker Q., Igelspacher J., Herzog H.-G. Parameter identification of an axial-flux induction machine by winding functions. In: *Proceedings of the 19th International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. 2010; 1–6. DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5608058

²⁹ Wymeersch B., De Belie F., Rasmussen C. B., Jensen F., Vandeveld L. Mutual-inductance modelling in line-start permanent-magnet synchronous machines based on winding-function theory. In: *Proceedings of the International Electric Machines and Drives Conference*. 2013; 607–611. DOI: 10.1109/IEMDC.2013.6556157

³⁰ Pradhan S. K., Srivastava R. K. Characteristics of stator inductances with interturn fault in PMBLDC motor using winding function approach. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*. 2013; 139–144. DOI: 10.1109/CATCON.2013.6737487

³¹ Faradji B., Ameer A., Kouzou A., Zaoui A. A three dimensional finite element method analysis and winding function theory for torque ripple reducing in reluctance machine. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*. 2016; 418–423. DOI: 10.1109/ICMIC.2016.7804148

³² Kyung-Tae K., Byeong-Woo K., Jin H. Magnetic characteristic analysis for detection of inter-turn fault using winding function theory. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 2012; 185–190. DOI: 10.1109/VPPC.2012.6422521

³³ Nourmohammadpour M., Khalilzadeh M., Abbaszadeh K. Accurate modeling of switched reluctance motor by using improved winding function method. In: *Proceedings of the 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. 2014; 793–797. DOI: 10.1109/IranianCEE.2014.6999644

³⁴ Zakharchevskii O. A. [About model of asynchronous machine].

³⁵ Schmitz N. L., Novotny D. W. *Introductory electromechanics*.

³⁶ Boldea I., Nasar S. A. *The induction machine handbook*.

³⁷ Available at: <http://people.ece.umn.edu/users/riaz>

³⁸ Joksimovic G., Riger J., Wolbank T., Peric N., Vasak M., Stojic G., Lesic V. Dynamic induction machine model accounting for stator and rotor slotting.

³⁹ Robyns B., Francois B., Degobert P., Hautier J. P. Vector control of induction machines.

⁴⁰ DOI: 10.1109/IAS.1995.530355



- calculation of the relative values of the magnetic fluxes of the windings with this new unit of magnetic flux;

- the use of the movable measuring winding, similar in design to the phase winding of the stator, as the image of any of windings of machine;

- application of correction functions for multiplication by elements of inductance matrices in the idealized AM model in order to obtain the model of real AM.

The correction functions (functions of the electric angle of displacement of the rotor windings relative to the stator windings) turned out to be suitable for clarifying the Clark and Park transformations [5; 7; 11]. The Clark and Park transformations were one of the foundations for all building systems of vector control of AM. Therefore, the correction functions could be applied in existing vector control systems (without the alteration of these control systems)⁴¹ [11].

Simulation in MATLAB showed that the refinement of the AM model according to the winding design has made electromechanical processes more similar to real processes [7; 11].

These results made it possible to create a method for controlling the rotation speed of a three-phase machine⁴¹. National Research Mordovia State University became the patent owner of this method of controlling electrical machines. The patent was tested for novelty in major countries.

Of course, even the most advanced calculations and simulations unable to replace the electric drive tests with a real mechanism. However, the improvement of the model serves to improve the asynchronous electric drive.

Useful properties of the method of relative magnitudes of magnetic fluxes – RMMF allow us to hope for its successful use for other types of electrical machines.

REFERENCES

1. Blondel A. Notes sur la theorie elementaire des appareils a champ tournant. La Lumiere Electrique. 1893; 50:605–616. (In French)
2. Park R. Two reaction theory of synchronous machines. Transactions AIEE. 1929; 48:716–730. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5055275>
3. Gorev A. A. [Basic equations the transient regime of the synchronous machine]. *Trudy Leningradskogo politekhnicheskogo instituta* = Works of Leningrad Polytechnical Institute. 1936; 5:32–49. (In Russ.)
4. Ansari A. A., Deshpande D. M. Mathematical model of asynchronous machine in MATLAB Simulink. International Journal of Engineering Science and Technology. 2010; 2(5):1260–1267.
5. Zakharchevskii O. A., Panfilov S. A. Display of the structure of windings in the model of the asynchronous machine. Collected Scientific Papers SWorld. 2013; 8(2):36–39.
6. Zakharchevskii O. A., Afonin V. V. Simulation of acceleration asynchronous machine. Collected Scientific Papers SWorld. 2013; 7(4):9–13.
7. Zakharchevskii O. A., Afonin V. V. [Accounting the design of induction machine windings at simulation in MATLAB]. *Elektronnoye modelirovaniye* = Electronic Modeling. 2014; 36(4):101–116. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/101017> (In Russ.)
8. Luo X., Liao Y., Toliyat H. A., Lipo T. A. Multiple coupled circuit modeling of induction machines. IEEE Transactions Industrial Applications. 1995; 31(2):311–317.
9. Akbari H., Meshgin-Kelk H., Milimonfared J. Extension of winding function theory for radial and axial nonuniform air-gap in salient pole synchronous machines. Progress in Electromagnetics Research. 2011; 114:407–428. Available at: <http://www.jpier.org/PIER/pier114/25.11011201.pdf>
10. Qi L., Fan T., Wen X. Armature-reaction magnetic field analysis for interior permanent magnet motor based on winding function theory. IEEE Transactions on Magnetics. 2013; 49(3):1193–1201. DOI: 10.1109/TMAG.2012.2224358

⁴¹ Zakharchevskii O. A., Afonin V. V. Patent RU. No. 2557071, IPC H02P 21/00 of 25.02.2013. The Method of vector control of speed of three-phase machine. Patentee: Mordovia State University. (In Russ.)

11. Zakharchevskii O. A., Afonin V. V. [Methods and algorithms to account the design of windings of asynchronous machine in frequency electric drives]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* = Bulletin of South Ural State University. Series Power Engineering. 2015; 15(4):74–82 (In Russ.)
12. Lubin T., Hamiti T., Razik H., Rezzoug A. Comparison between finite-element analysis and winding function theory for inductances and torque calculation of a synchronous reluctance machine. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2007; 43(8):3406–3410. DOI: 10.1109/TMAG.2007.900404
13. Tassarolo A. Accurate computation of multiphase synchronous machine inductances based on winding function theory. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2012; 27(4):895–904. DOI: 10.1109/TEC.2012.2219050
14. Kyung-Tae K., Jun-Kyu P., Jin H., Byeong-Woo K. Comparison of the fault characteristics of IPM-type and SPM-type BLDC motors under inter-turn fault conditions using winding function theory. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2014; 50(2):986–994. DOI: 10.1109/TIA.2013.2272911
15. Bossio G., Angelo C. D., Solsona J., Garcia G., Valla M. I. A 2-D model of the induction machine: An extension of the modified winding function approach. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2004; 19(1):144–150.
16. Serrano-Iribarnegaray L., Cruz-Romero P., Gomez-Exposito A. Critical review of the modified winding function theory. *Progress in Electromagnetics Research*. 2013; 133:515–534.

Submitted 21.11.2017; revised 28.12.2017; published online 20.03.2018

About the author:

Oleg A. Zakharchevskii, Associate Professor, Electronics and Electrical Engineering Chair, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: M-6499-2017, ORCID: <http://orcid.org/orcid.org/0000-0002-1099-5908>, zakol39@mail.ru

The author has read and approved the final version of the manuscript.

Поступила 21.11.2017; принята к публикации 28.12.2018; опубликована онлайн 20.03.2018

Об авторе:

Захаржевский Олег Александрович, доцент кафедры электроники и электротехники, Институт электроники и светотехники, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ResearcherID: M-6499-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1099-5908>, zakol39@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.



Проектирование структуры технологических процессов на основе синтеза

С. Ю. Калякулин^{1*}, В. В. Кузьмин², Э. В. Митин¹,
С. П. Сульдин¹, Т. Б. Тюрбеева²

¹ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

²ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН» (г. Москва, Россия)

*rim-tm@mail.ru

Введение. Процесс автоматизации проектирования структуры технологических процессов достаточно сложен в виду множества разработанных, но слабо формализованных правил проектирования и динамичности схем их применения. Вследствие этого разработанные в настоящее время системы используют эвристические алгоритмы формирования структур. Целью работы является повышение уровня проектирования структуры технологических процессов на основе синтеза при решении задачи выбора конструкторско-технологических баз.

Материалы и методы. В основе полученных научных результатов лежат фундаментальные положения теории проектирования, теории машиностроения, теории графов, теории моделей, методологии проектирования ТП механической обработки, логики предикатов и исчисления высказываний.

Результаты исследования. Установлены связи между параметрами структуры технологических процессов и выбором конструкторско-технологических баз. Описана математическая постановка задачи оптимизации выбора конструкторско-технологических баз при решении задачи на графе и выбором конструкторско-технологических баз. Описана математическая постановка задачи оптимизации выбора конструкторско-технологических баз при решении задачи на графе.

Обсуждение и заключения. Задачи, решенные в данной статье, позволяют сделать шаг к повышению уровня проектирования структуры технологических процессов на основе синтеза при выборе конструкторско-технологических баз. Реализация в системах автоматизированного проектирования технологических процессов описанной в статье задачи позволит повысить общий уровень автоматизации проектирования данных процессов при проектировании структуры технологических процессов на основе синтеза при выборе конструкторско-технологических баз. Реализация в системах автоматизированного проектирования технологических процессов описанной в статье задачи позволит повысить общий уровень автоматизации проектирования данных процессов.

Ключевые слова: технологический процесс, структура, синтез, система, бинарное отношение, алгоритм, поверхность

Для цитирования: Проектирование структуры технологических процессов на основе синтеза / С. Ю. Калякулин [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 1. С. 77–84. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.077-084

Designing the Structure of Technological Processes Based on Synthesis

S. Yu. Kalyakulin^{a*}, V. V. Kuzmin^b, E. V. Mitin^a,
S. P. Suldin^a, T. B. Tyurbееva^b

^aNational Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

^bMoscow State Technical University "STANKIN"
(Moscow, Russia)

*rim-tm@mail.ru

Introduction. The aim of the work is to develop an algorithm for designing a process based on synthesis.

Materials and Methods. The paper gives an account of developing the structure of technological processes in an automated mode. The authors demonstrate the complexity of the formalization. Many factors must be taken into account when developing it. An algorithm was developed that makes it possible to solve the problems based on synthesis of technological processes.

Results. The authors found the relationships between the parameters of the structure of technological processes based on the formation of a set of permissible transitions. The relationships between structural parameters, such as "surface-technological methods", "method-machine", "tool-tool-tool" are revealed. A generalized algorithm based on the synthesis of the technological process of machining is developed.

Discussion and Conclusions. The present study allows to forward increasing the level of automation of calculating parameters in computer aided design systems. The implementation of the algorithm of designing technological processes developed on the basis of synthesis will allow increasing the overall level of automation of technological processes design.

Keywords: technological process, structure, synthesis, system, binary relation, algorithm, surfaces

For citation: Kalyakulin S. Yu., Kuzmin V. V., Mitin E. V., Suldin S. P., Tyurbееva T. B. Designing the Structure of Technological Processes Based on Synthesis. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovian University Bulletin. 2018; 28(1):77–84. DOI: 10.15507/0256-2910.028.018.077-084

Введение

Процесс автоматизации проектирования структуры технологических процессов (ТП) достаточно сложен в виду множества разработанных, но слабо формализованных правил проектирования и динамичности их применения. Вследствие этого разработанные в настоящее время системы используют эвристические алгоритмы формирования структур. Данные алгоритмы, как правило, ориентированы на небольшое количество возможных производственных операций и не позволяют сделать данные системы адаптивными и широко тиражируемыми, а решения, которые формирует система, требуют корректирования. Для

проектирования структуры необходимо ввести в систему большое количество информации о производственной среде и изготавливаемом изделии. Режим диалога, встроенный в систему, позволяет вводить исходную информацию, корректировать принятые решения и производить ряд других операций. Однако в том случае, если алгоритмы не предназначены для конкретной производственной ситуации, невозможно достичь повышения эффективности проектирования структуры ТП даже при использовании диалогового режима. Оперативное внесение изменений и дополнений в разработанную систему проектирования также не всегда возможно.



Обзор литературы

Под ТП понимается система, для которой характерны понятия структуры и параметров [1]. Структурный аспект добавляется к определению ТП, поскольку на уровень развития технологии влияют не только методы обработки, но и структуры. На основе этого уточняются технологические понятия. Дальнейшее развитие понятие структуры ТП получило в работах В. Д. Цветкова¹. По его мнению, данная структура состоит из 3-х основных составляющих: функциональной (которая определяет порядок переходов из одного состояния детали в другое), пространственной и временной. В. В. Борзенков, в свою очередь, описывает топологические свойства макроэлементов, структуры деталей в системе автоматизированного проектирования (САПР) ТП [2].

Выбор структуры в частично автоматизированном режиме стал возможным только в начале 1980-х гг., когда мощность ЭВМ позволила частично решить данную проблему. Большое количество работ посвящено выбору структуры в автоматизированном режиме; многие из них получили практическое применение. Например, А. А. Саратов разработал оригинальный алгоритм структурно-параметрического синтеза производственного расписания, оптимизированный по критерию минимизации издержек производства при задержке выполнения заказов [3]. Н. П. Белков разработал методику выбора комплектов технологических баз на операциях механической обработки машиностроительных деталей [4–5]. В. Н. Бровцин предложил метод адаптивного управления и структуры настраиваемых моделей технологических процессов сельскохозяйственного производства [6]. З. Т. Акашев описывал методологию совершенствования и выбора структу-

ры технологических процессов горнодобывающих предприятий [7].

Одной из первых работ в области формализации накопленных знаний является диссертация А. А. Саратова², в которой автор продемонстрировал взаимосвязь между выбором технологических баз и последующим синтезом геометрической схемы ТП. Данная схема состоит из совокупности поверхностей (заготовки, готовой детали, предварительно обработанных поверхностей) а также соотношений и размеров, которые связывают поверхности между собой. ТП в геометрическом отношении может быть представлен в виде результата последовательного смещения режущих и установочных элементов инструмента и приспособления с обрабатываемыми и базирующими поверхностями детали. Продолжением данного подхода стали работы В. В. Кузнецина и Д. Е. Максимовского [8–9], которые рассматривали способ выбора технологических баз для корпусных деталей в автоматизированном производстве с использованием САПР ТП.

Материалы и методы

В статье предложен метод проектирования структуры ТП на основе синтеза. В основе полученных научных результатов лежат фундаментальные положения теории базирования, технологии машиностроения, теории графов, теории моделей, методологии проектирования ТП механической обработки, логики предикатов и исчисления высказываний.

Результаты разработанного метода рекомендуется использовать при проектировании структуры ТП в автоматизированном режиме в САПР ТП.

Результаты исследования

Выбор структуры ТП для корпусных деталей на основе синтеза пред-

¹ Цветков В. Д. Система автоматизации проектирования технологических процессов. М. : Машиностроение, 1972. 240 с. URL: <http://www.libex.ru/detail/book596295.html>

² Саратов А. А. Моделирование процесса выбора технологических баз при автоматизированном проектировании : дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1983. 198 с.

ставляет собой многовариантную задачу в силу особенностей их геометрической структуры: деталь ограничена большим количеством обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей π . Поэтому количество комплектов технологических баз (КТБ), формируемых на поверхностях π , достаточно велико по сравнению с деталями типа тела вращения. В последнем случае КТБ формируются однозначно (либо ось центровых отверстий при обработке в центрах, либо поверхности торцов при обработке в патроне с переустановом), а технологические базы при первых операциях назначаются в зависимости от типа производства (либо на универсальных, либо на фрезерно-центровальных станках). По сути, решение задачи разработки структуры ТП на основе синтеза в первую очередь должна сводиться к выбору технологических баз детали, для которой разрабатывается структура [10].

При выборе КТБ необходимо учитывать многочисленные ограничения и критерии, которые определяют набор свойств. К важнейшим из них относятся:

- лишение заготовки детали 6-и степеней свободы при установке в приспособлении по выбранным поверхностям КТБ;
- наиболее удобная и экономичная конструкция приспособления;
- обеспечение заданной точности замыкающих звеньев (размеров на чертеже с допусками) для составляющих звеньев размерных цепей, которые определяются выбранными технологическими базами;
- свойство оптимальности по критерию количества переустановов.

Выбор оптимального варианта зависит от многочисленных факторов: серийность и уровень автоматизации производства, точность технологической системы (станок и технологическая оснастка), се-

бестоимость и цикл обработки, точность размеров заготовки, структура поверхностного слоя главных поверхностей.

Рассмотрим перечисленные ограничения и критерии при выборе КТБ на примере корпусной детали (рис. 1).

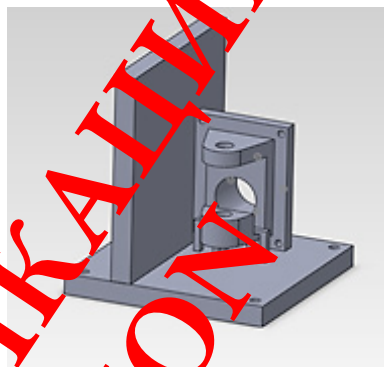


Рис. 1. Деталь типа корпус

Fig. 1. Body type part

Сформулируем задачу выбора (КТБ) в виде экстремальной задачи на графе.

Пусть задан граф

$$G = \{P, U\}, \quad (1)$$

где P – множество вершин, отражающих состояния поверхностей в процессе обработки от заготовки до окончательной обработки; U – множество дуг, отражающих размерные связи между поверхностями (конструкторские, технологические, размеры припусков и заготовки).

Конструкторские размеры и припуски являются замыкающими звеньями размерных цепей, а технологические размеры и заготовки – составляющими. Подчеркнем, что любому замыкающему звену соответствует только одна размерная цепь.

В графе G выделим на основе моделирования возможных КТБ подграф $G_T \in G$, который отражает возможности обработки поверхностей с различных технологических баз (или технологический подграф).



Требуется найти граф $G_{TP} \in G_T$, обладающий свойством оптимальности по критерию W , который определяет число его уровней.

Рассмотрим свойства подграфа $G_{TP} = \{P_{TP}, U_{TP}\}$, необходимые для постановки экстремальной задачи на графах.

1. Множество вершин подграфа G_{TP} и графа G_T совпадают, т. е. $P_{TP} = P_T$.

2. В каждую вершину подграфа G_{TP} , кроме вершин заготовки, входит одна дуга технологического размера или размера заготовки.

3. Ни одна дуга, принадлежащая составляющим звеньям, не может соединять вершины, принадлежащие одной и той же поверхности.

4. Для каждого замыкающего звена существует только одна размерная цепь.

Свойства 1–4 являются основными свойствами подграфа G_{TP} .

Для формулировки экстремальной задачи на графах требуется установить дополнительные свойства подграфа G_{TP} .

5. Свойство оптимальности по критерию $W(G_{TP})$, определяющее минимальное число его уровней (число переустановов), т. е.

$$W(G_{TP}^*) = \min_{G_{TP} \in G_T} W(G_{TP}(x)). \quad (2)$$

6. Обеспечение заданной точности конструкторских размеров выполняется путем проверки выполнения неравенства: допуски на конструкторские размеры должны быть меньше суммы допусков на составляющие звенья размерных цепей, замыкающих конструкторский размер.

Для проверки этого условия необходимо выполнить следующие этапы алгоритма:

– для каждого конструкторского размера (замыкающего звена) определить размерную цепь;

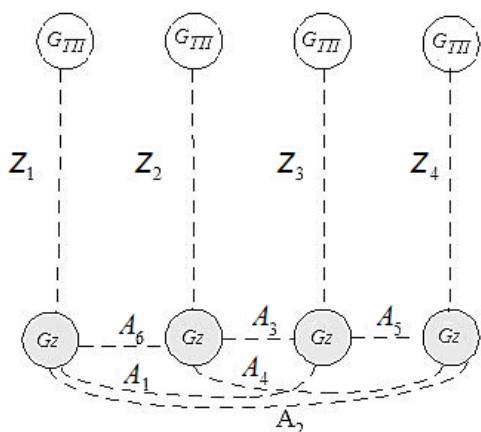
– определить по чертежу показатели точности g конструкторских размеров;

– определить по справочной информационной базе показатели точности технологических размеров, размеров заготовки (другими словами, выполнить взвешивание дуг составляющих звеньев показателями точности относительного положения поверхностей в результате обработки поверхности p_j на основе технологической базы p_i), а также показатели точности линейных размеров, полученных технологическими методами обработки на различных этапах (черновое, получистовое, чистовое, финишное);

– выполнить суммирование f погрешностей составляющих звеньев размерной цепи алгебраическим методом (если обработка поверхностей выполняется на основе одной технологической базы, то погрешности базирования компенсируются);

– выполнить проверку условия $f < g$, т. е. погрешность замыкающего звена, указанная на чертеже, должна быть больше суммы погрешностей составляющих звеньев соответствующей размерной цепи; если условие не выполняется, то ТП не удовлетворяет свойству 6.

Математическая постановка задачи оптимизации выбора технологических баз δ в зависимости от перечисленных выше факторов используют критерий оптимальности $W(x)$ по количеству переустановов и ограничения $\Omega(x)$. Оптимизация структуры ТП с формальной точки зрения зависит от расположения μ составляющих звеньев размерных цепей относительно замыкающих звеньев. При этом структура замыкающих звеньев является фиксированной для рассматриваемой задачи, а расположение μ определяется выбором подграфа G_{TP} . Структура замыкающих звеньев G_z применительно к корпусной детали показана на рис. 2.



Р и с. 2. Структура замыкающих звеньев применительно к корпусной детали (A – конструкторские размеры; Z – размеры межпереходных припусков)

F i g. 2. The structure of closing links in relation to a body part (A – design dimensions; Z – dimensions of intertransport allowances)

Обсуждение и заключения

Разработана математическая постановка задачи выбора КТБ на основе синтеза структуры ТП, представленного в виде классической задачи выделения из заданного технологического графа G_T подграфа G_{TP} с заданными свойствами:

На основе анализа исходного графа методами размерного анализа можно обосновать следующие рекомендации:

– при выборе структуры ТП на основе синтеза нецелесообразно использовать различные технологические базы (смену баз) на необработанных поверхностях;

– при выборе структуры ТП на основе синтеза и использовании критерия оптимальности (неравномерности припуска старших поверхностей) в качестве технологических баз при первых операциях целесообразно использовать главные поверхности в состоянии заготовки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Селиванов С. Г. Каскадный метод оптимизации проектных технологических процессов в АСПП на основе использования искусственных нейронных сетей // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2014. Т. 18, № 3. С. 170–174. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22670806>
2. Борзенков В. В. Топологические свойства моделей элементов, описывающих структуру деталей в САПР ТП механической обработки // Сб. мат.-нав. науч.-практ. конф. с междунар. участием. 2013. С. 18–21. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22658937>
3. Саратов А. А. Конкурентный метод выбора производственных расписаний // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 3. С. 104–110. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22773333>
4. Новиков О. А., Байбаков С. В. Методы выбора технологических баз при проектировании технологических процессов механической обработки // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. 2009. № 4. С. 72–77. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12981272>
5. Байбаков С. В. Система комплексной автоматизации технологической подготовки производства // Программные продукты и системы. 2010. № 1. С. 28. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=14870189>
6. Бровин В. И. Выбор методов адаптивного управления и структуры настраиваемых моделей технологических процессов сельскохозяйственного производства // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 1996. № 66. С. 45–54. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23067702>
7. Алексеев З. Т. Методология совершенствования и выбора структуры технологических процессов горнодобывающих предприятий // Тяжелое машиностроение. 2005. № 12. С. 17–19. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9482961>
8. Кузьмин В. В., Максимовский Д. Е. Выбор технологических баз на основе решения прямой задачи размерного анализа // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. № 2. С. 64–69. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17847920>
9. Maksimovskii D. E. Automation of process design by design-technological parameterization // Russian Engineering Research. 2011. Vol. 31, no. 9. С. 870–872. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24009566>



10. Kalyakulin S. Yu. Algorithm for calculating the parameters of the initial blank in the SITEP MO automated design system // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34, no. 11. С. 713–715. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24009566>

Поступила 14.12.2017; принята к публикации 11.01.2018; опубликована онлайн 20.03.2018

Об авторах:

Калякулин Сергей Юрьевич, доцент кафедры технологии машиностроения, Рузаевский институт машиностроения, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), кандидат технических наук, ResearcherID: V-5619-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0644-7746>, rim-tm@mail.ru

Кузьмин Владимир Владимирович, профессор кафедры технологии машиностроения, факультет машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН» (127994, Россия, г. Москва, Вадковский пер., д. 1), доктор технических наук, ResearcherID: V-5405-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6318-8563>, kvv2607@yandex.ru

Митин Эдуард Валерьевич, доцент кафедры технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), кандидат технических наук, ResearcherID: V-5383-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9899-3420>, rimnauka@rambler.ru

Сульдин Сергей Петрович, заведующий кафедрой технологии машиностроения, Рузаевский институт машиностроения, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), кандидат технических наук, ResearcherID: V-5381-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8159-6322>, rimstanok@mail.ru

Тюрбеева Татьяна Борисовна, доцент кафедры информационных технологий и вычислительных систем, Институт информационных систем и технологий, ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН» (127994, Россия, г. Москва, Вадковский пер., д. 1), кандидат технических наук, ResearcherID: V-5050-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6693-5971>, turbeyv@mail.ru

Вклад соавторов:

С. Ю. Калякулин: разработка алгоритма структуры технологических процессов на основе синтеза; В. В. Кузьмин: научное руководство, постановка задачи исследования; Э. В. Митин: анализ литературных данных; С. П. Сульдин: разработка модели технологических процессов; Т. Б. Тюрбеева: написание текста статьи, его верстка и редактирование; построение графа бинарных отношений.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Selivanov G., Gajitova G. F., Yashin A. I., Shayhulova A. F. Cascade optimization method technological process routes in automated systems production planning with using artificial neural network. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviaionnogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of Ufa State Aviation Technical University. 2014; 18(1):170–174. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22670806> (In Russ.)
2. Borzenko V. V. [Topological properties of macroelements that describe the structure of parts in the CAD of mechanical processing]. Proceedings of the Scientific Practical Conference with International Participation. 2013; 18–21. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22658937> (In Russ.)
3. Selivanov A. A. Competitive method of synthesis of the machine scheduling. *Izvestiya tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* = Tula State University Bulletin. Technical Science. 2014; 3:104–110. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21770365> (In Russ.)
4. Novikov O. A., Baybakov S. V. [Technique of selection of technological bases for designing technological processes of mechanical processing]. *Upravleniye kachestvom v neftegazovom komplekse* = Quality Management in Oil and Gas Complex. 2009; 4:73–75. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=12981272> (In Russ.)

5. Baybakov S. V. [The system of complex automation of technological preparation of production]. *Programmnyye produkty i sistemy* = Software Products and Systems. 2010; 1:28. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=14870189> (In Russ.)
6. Brovtsin V. N. [The choice of the method for adaptive control and the structure of customizable models of technological processes of agricultural production]. *Tekhnologii i tekhnicheskiye sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rasteniyevodstva i zhivotnovodstva* = Technologies and Technical Means of Mechanized Production of Crop and Livestock Production. 1996; 66:45–46. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=23067702> (In Russ.)
7. Akashev Z. T. [The methodology of improvement and selection of the structure of mining enterprises' technological processes]. *Tyazhelaye mashinostroyeniye* = Heavy Engineering. 2005; 12:17–19. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=9482961> (In Russ.)
8. Kuzmin V. V., Maksimovskii D. E. Choice of technological bases on the basis of the decision of a direct problem of the dimensional analysis // *Vestnik MGTU "STANKIN"* = MSTU STANKIN Bulletin. 2012; 2:64–69. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17840020> (In Russ.)
9. Maksimovskii D. E. Automation of process design by design technological parameterization. *Russian Engineering Research*. 2011; 31(9):870–872. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=24009566>
10. Kalyakulin S. Yu. Algorithm for calculating the parameters of the initial blank in the SITEP MO automated design system. *Russian Engineering Research*. 2014; 34(11):712–715. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=24009566>

Submitted 14.12.2017; revised 11.04.2018; published online 20.03.2018

About the authors:

Sergey Yu. Kalyakulin, Associate Professor, Chair of Mechanical Engineering Technology, Ruzayevka Institute of Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: O-6519-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0644-7746>, rim-tm@mail.ru

Vladimir V. Kuzmin, Professor, Chair of Mechanical Engineering Technology, Faculty of Engineering Technologies and Equipment, Moscow State Technical University "STANKIN" (1st Vadkovskiy Pereulok, Moscow 1127994, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: V-5405-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6318-8563>, kvv2607@yandex.ru

Eduard V. Mitin, Associate Professor, Chair of Mechanical Engineering Technology, Ruzayevka Institute of Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: V-5383-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9899-3420>, rimnauka@mail.ru

Sergey P. Suldin, Head of Chair of Mechanical Engineering Technology, Ruzayevka Institute of Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: V-5381-2017, <http://orcid.org/0000-0002-8159-6322>, rimstanok@mail.ru

Tatyana B. Tyurbееva, Associate Professor, Chair of Information Technology and Computer Systems, Institute of Information Systems and Technologies, Moscow State Technical University "STANKIN" (1st Vadkovskiy Pereulok, Moscow 1127994, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: V-5050-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6693-5974>, turbeev@mail.ru

Contribution of the co-authors:

S. Yu. Kalyakulin: developing an algorithm for structure of technological processes based on synthesis; V. V. Kuzmin: scientific management, formulating research aims; E. V. Mitin: analysis of literary data; S. P. Suldin: developing models of technological processes; T. B. Tyurbееva: writing the draft, word processing and editing the text, building a graph of binary relations.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.



ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ / COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

УДК 004.738.5'056

DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.085-094



Анализ угроз информационной безопасности протоколов и систем управления освещением

С. Н. Ивлиев*, С. Л. Крылова, С. А. Шиков*ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)***ivliev_sn@mail.ru*

Введение. В статье рассматриваются возможные угрозы в сфере информационной безопасности при использовании PLC-технологий (power line communications). Подобные технические решения дают возможность управления и обратной связи с управляемыми устройствами, однако данные технологии не соответствуют необходимому уровню информационной безопасности. В статье предлагаются пути решения данной проблемы.

Материалы и методы. Рассмотрены объекты и методы исследования; указаны проводимые исследования и список решаемых задач, проведен анализ угроз информационной безопасности.

Результаты исследования. Приводится общая модель информационной системы, а также модель угроз для системы управления освещением по протоколу Dali.

Обсуждение и заключения. Были сделаны выводы по уязвимостям рассмотренных примеров. Даны общие рекомендации о необходимых действиях по увеличению уровня безопасности в сегменте протоколов управления освещением. Был составлен список минимальных объемов мероприятий по обеспечению безопасного функционирования систем освещения: идентификация и аутентификация субъектов доступа и объектов доступа; управление доступом субъектов доступа к объектам доступа; ограничение программной среды; защита машинных носителей информации; регистрация событий безопасности; антивирусная защита; обнаружение вторжений и др.

Ключевые слова: информационная безопасность, угроза информационной безопасности, информационная система, управление освещением, PLC-технологии

Для цитирования: Ивлиев С. Н., Крылова С. Л., Шиков С. А. Анализ угроз информационной безопасности протоколов и систем управления освещением // Вестник Мордовского университета. 2017. Т. 27, № 4. С. 85–94. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.085-094

The Analysis of Threats to Information Security of Protocols and Lighting Control Systems

S. N. Ivliyev*, S. L. Krylova, S. A. Shikov

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

*ivliyev_sn@mail.ru

Introduction. The paper considers the possible threats to information security when using PLC-technologies (power lines). Such technical solutions allow controlling and providing feedback with controllable devices. However, these technologies do not meet the safety requirements. The purpose of this investigation is to explore the problem and suggest solutions.

Materials and Methods. The aims and methods of investigation are presented. The conducted researches and the list of solved problems are indicated. The analysis of information security threats has been carried out.

Results. The study presents a general information system model. The model of threats to the lighting control system was developed using the Dali protocol.

Discussion and Conclusions. The authors have analyzed the factors that determine vulnerabilities of the analyzed examples. The level of safety in the segment of lighting control protocols must be increased. We provide the list of minimum measures to ensure the safe operation of lighting systems. The findings of this study have a number of important implications for future practice.

Keywords: information security, information security threat, information system, lighting control, PLC-technologies

For citation: Ivliyev S. N., Krylova S. L., Shikov S. A. The Analysis of Threats to Information Security of Protocols and Lighting Control Systems. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(1):85–94. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.085-094

Введение

Одним из наиболее современных направлений в области энергосбережения и энергоэффективности является внедрение систем интеллектуального управления. Наиболее эффективным решением принято считать применение PLC-технологий (power line communications), или управление оконечными устройствами энергопотребления по сетям электропитания. Используемые в практике технические решения позволяют не только управлять потоками энергии, но и осуществлять «обратную связь» с целью контроля эксплуатационных параметров управляемой системы. По аналогичной схеме построен и т. н. «интернет вещей». Даже имеются решения по передаче данных для ограниченного круга потребителей в условиях «последней мили». На рынке присутствует большое

количество предложений управляющих контроллеров и модемов для подключения информационных каналов к сетям электроснабжения. При этом большинство технических решений использует фирменные технологии и совершенно не учитывает аспекты информационной безопасности. Исследованию указанной проблемы и посвящена данная работа.

Обзор литературы

Имеется огромное количество научного материала, касающегося технических аспектов использования указанных технологий, например, порядка подключения контроллеров или модемов [1–3]. При этом основное внимание уделяется вопросам электромагнитной совместимости и передаточных характеристик каналов связи, использующих линии электропередач [4–6]. Ограниченное количество исследований



посвящено изучению технических каналов утечки информации в PLC-системах [7–9].

Интересным представляется материал по изучению возможностей применения PLC-технологий Yitran в системе управления блокировкой безопасности распределительных устройств высокого напряжения [6]. В данной работе предлагается оценивать надежность передачи информации на основании спектрального анализа сигнала, при этом отмечается зависимость характеристик передачи сигнала от параметров потребителей электроэнергии.

На основании изученного материала можно сделать вывод о многокомпонентности системы управления освещением. При таком подходе значительно увеличивается количество актуальных угроз, связанных с перехватом управления объектом. На базе Института электроники и светотехники ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» также рассматривались вопросы безопасности информационных систем, предназначенных для управления технологическим оборудованием и построенных по принципу «Интернета вещей»^{1–2} [10].

В связи с этим представляется необходимым исследовать надежность протоколов управления системами ос-

вещения. На основе анализа предложений по решению вопросов удаленного управления системами освещения констатируем, что наиболее распространенными протоколами управления системами освещения являются промышленные протоколы 1-10В, DMX, Dali. Первый из отмеченных протоколов является аналоговым, и его использование ограничивается небольшими осветительными установками, в основном при бытовом освещении.

Протоколы DMX и Dali позволяют управлять осветительными установками, где объекты управления могут располагаться на удалении от систем управления на расстоянии от нескольких сотен метров до нескольких километров. При этом протокол Dali является открытым и поддерживается такими крупными производителями осветительной арматуры как OSRAM. Необходимо отметить, что эти протоколы, как указано в спецификации, не являются протоколами безопасной передачи данных и требуют применения дополнительных средств обеспечения защиты информации^{3–6}.

Материалы и методы

Целью представленной работы является выработка рекомендаций по построению систем управления освеще-

¹ **Ивлиев С. Н.** Интернет вещей: новые угрозы информационной безопасности // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики : мат-лы XII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Саранск, 28–29 мая 2015 г.) в рамках III Всерос. светотехнич. форума с междунар. участием. Саранск : Издатель Афанасьев В. С., 2015. С. 435–441. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemny-informatsionnoy-bezopasnosti-internet-veschey>

² **Ивлиев С. Н.** Решение проблем безопасности информационно-технологического комплекса предприятий светотехнической отрасли на основе международных стандартов // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики : мат-лы XII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Саранск, 28–29 мая 2015 г.) в рамках III Всерос. светотехнич. форума с междунар. участием. Саранск : Издатель Афанасьев В. С., 2015. С. 428–434. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24179114>

³ Руководство по применению DMX512. URL: <http://dsl.msk.ru/rus/around/dmx512/dmx512.htm>

⁴ OSRAM Professionals LMS DALI index. URL: http://www.osram.ru/osram_ru/Professionals/LMS/DALI/index.htm

⁵ OSRAM Professionals ECG ECGs for FL and CFL Dimmable ECGs with DALI QT DALI DIM-CFL index. URL: http://www.osram.ru/osram_ru/Professionals/ECG/ECGs_for_FL_and_CFL/Dimmable_ECGs_with_DALI_QTi_DALI_DIM-CFL/index.html

⁶ OSRAM Professionals ECG ECGs for FL and CFL Dimmable ECGs with DALI QT DALI DIM-T5 index. URL: http://www.osram.ru/osram_ru/Professionals/ECG/ECGs_for_FL_and_CFL/Dimmable_ECGs_with_DALI_QTi_DALI_DIM-T5/index.html

шением с точки зрения обеспечения информационной безопасности. Для ее достижения были решены следующие задачи:

- проанализированы основные требования по безопасной эксплуатации промышленных программируемых контроллеров;
- изучены основные угрозы безопасности в автоматизированных системах управления технологическим оборудованием;
- выявлены актуальные угрозы безопасности;
- разработаны мероприятия по минимизации рисков, связанных с эксплуатацией систем управления освещением.

Основными нормативными документами, содержащими требования к программируемым контроллерам, является серия ГОСТ Р МЭК 61131⁷, в частности, часть 6 «Безопасность функциональная». Для анализа угроз безопасности был использован банк угроз ФСТЭК России⁸.

Требования по функциональной безопасности программируемых логических контроллеров (ПЛК-ФБ) в стандарте представлены в виде политики безопасности для всех этапов жизненного цикла изделия. Для обеспечения максимальной безопасности данных необходимо:

- логическое управление доступом к ПЛК-ФБ и между ними, включая человеко-машинные интерфейсы;
- административное управление, такое, чтобы для конкретного условия безопасности выполнялся общий подход по управлению и администрированию политики обеспечения безопасности на условиях единоначалия с общей ответственностью;
- физическое управление, ограничивающее несанкционированный

доступ к ПЛК-ФБ (включая вспомогательные части, кабельные соединения, разъемы).

Общими угрозами в области информационной безопасности в системах автоматического управления на основании банка угроз ФСТЭК, являются:

- угроза несанкционированного удаленного внеполосного доступа к аппаратным средствам (УБИ.092);
- угроза несогласованности правил доступа к большим данным (УБИ.097);
- угроза подмены беспроводного клиента или точки доступа (УБИ.126);
- угроза перехвата управления автоматизированной системой управления технологическими процессами (УБИ.183);
- угроза перехвата вводимой и выводимой на периферийные устройства информации (УБИ.115);
- угроза перехвата привилегированного потока (УБИ.117);
- угроза перехвата исключения/сигнала из привилегированного блока функций (УБИ.163);
- угроза перехвата одноразовых паролей в режиме реального времени (УБИ.181).

При актуализации угроз в системах управления освещением учитывалось, что основным элементом, обеспечивающим функционирование системы управления освещением, является телекоммуникационная сеть. Через данную сеть производится съем информации с различного рода датчиков и передача их главному контроллеру для обработки. Контроллер после обработки информации осуществляет передачу сигналов управления на исполнительные элементы. Через центральный контроллер происходит настройка и управление системой освещения легальным пользователем, а также через него при необходимости осуществляется передача

⁷ ГОСТ Р МЭК 61131. URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/61912>

⁸ Банк угроз информационной безопасности. URL: <http://bdu.fstec.ru/threat?page=3>



заданной информации пользователю системы через внешнюю сеть при его отсутствии в помещении (например, о несанкционированном проникновении). Такая телекоммуникационная сеть может быть построена с использованием как проводных, так и беспроводных каналов связи, например, Wi-Fi, Bluetooth или 3G.

Анализ угроз и нарушений безопасности необходимо проводить для связанных с безопасностью применений систем автоматического управления освещением с целью защиты как от преднамеренных атак, так и от неумышленных изменений параметров функционирования⁹.

Безопасность может быть достигнута с помощью компенсирующих мер обеспечения безопасности и выполне-

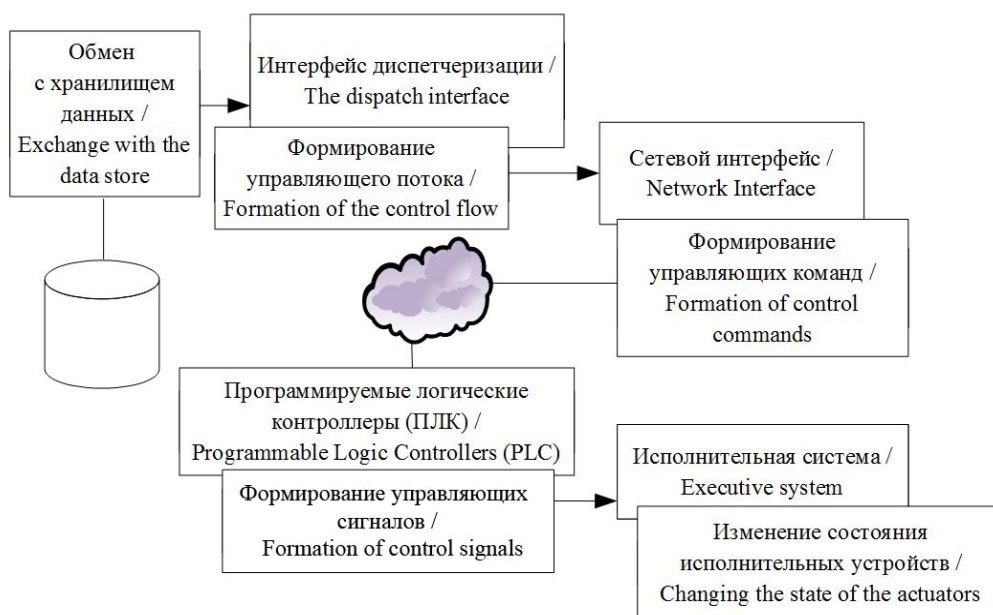
ния защитных мероприятий, таких как физические (например, механические средства, электронные средства) или организационные.

Если связанные с безопасностью коммуникации являются частью PLC-систем, то существует возможность непреднамеренных изменений параметров сетевых устройств. Связанные с безопасностью коммуникационные устройства должны иметь средства защиты от непреднамеренных изменений.

Результаты исследования

Для построения общей модели угроз системы управления освещением была построена общая модель информационной системы (рисунок).

При построении данной общей модели угроз особое внимание было уде-



Р и с у н о к. Общая модель информационной системы

Figure. The general model of the information system

⁹ Приказ Федеральной службы по техническому и экспортному контролю от 14 марта 2014 г. № 31 «Об утверждении Требований к обеспечению защиты информации в автоматизированных системах управления производственными и технологическими процессами на критически важных объектах, потенциально опасных объектах, а также объектах, представляющих повышенную опасность для жизни и здоровья людей и для окружающей природной среды». URL: <http://fstec.ru/normotvorcheskaya/poisk-po-dokumentam/110-tehnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/prikazy/864-prikaz-fstek-rossii-ot-14-marta-2014-g-n-31>

лено уровню ПЛК, поскольку для исследуемой информационной системы этот уровень наиболее уязвим с точки зрения надежности протокола и, кроме того, нарушение свойств безопасности на этом уровне приводит к наиболее

существенным нарушениям в работе управляемой системы.

На основании выше изложенного была построена модель угроз для системы управления освещением по протоколу Dali, представленная в таблице.

Т а б л и ц а

Table

Модель угроз системы управления освещением

The model of threats to the lighting control system

Описание угрозы / Threat description	Содержание угрозы / Threat content	Источник / Source	Вероятность реализации угрозы / Probability of threat realization
1	2	3	4
Угроза несанкционированного удаленного внеполосного доступа к аппаратным средствам / Threat of unauthorized remote out-of-band access to hardware	Угроза обусловлена невозможностью контроля над механизмом, реализующего функции удаленного доступа на аппаратном уровне, на уровне операционной системы, а также независимостью от состояния питания аппаратных устройств, т. к. данный механизм предусматривает процедуру удаленного включения/выключения аппаратных устройств / The threat is caused by the inability to control the mechanism that implements the functions of remote access at the hardware level, at the level of the operating system, and independence from the state of power of the hardware devices. This mechanism provides a procedure for remote on/off of hardware devices	Внешний нарушитель с высоким потенциалом / External violator with high potential	Средняя / Medium
Угроза несогласованности правил доступа к большим данным / Threat of inconsistency of access rules to large data	Угроза обусловлена недостаточностью мер по разграничению и согласованию доступа к информации различных пользователей в хранилище больших данных / The threat is caused by the inadequacy of measures to differentiate and harmonize access to information from various users in a large data warehouse	Внутренний нарушитель с низким потенциалом / Internal intruder with low potential	Высокая, для систем наружного освещения объектов большой площади / High, for outdoor lighting systems of large areas
Угроза подмены беспроводного клиента или точки доступа / Threat of spoofing a wireless client or access point	Угроза обусловлена слабостями механизма аутентификации субъектов сетевого взаимодействия при беспроводном доступе / The threat is due to the weaknesses of the mechanism for authentication of subjects of network interaction with wireless access	Внешний нарушитель с низким потенциалом / External offender with low potential	Высокая, при наличии беспроводных сегментов сети / High, if there are wireless network segments



Продолжение табл. / Table continuation

1	2	3	4
Угроза перехвата управления автоматизированной системой управления технологическими процессами / Threat of interception of control by an automated process control system	Угроза заключается в возможности осуществления нарушителем несанкционированного доступа к информационной инфраструктуре за счет получения нарушителем права управления входящей в ее состав автоматизированной системой управления технологическими процессами путем эксплуатации уязвимостей ее программного обеспечения или слабостей технологических протоколов передачи данных / The threat lies in the ability of the violator to perform unauthorized access to the information infrastructure by getting the violator the right to manage the automated process control system included in its composition by exploiting the vulnerabilities of its software or the weaknesses of technological data transfer protocols	Внутренний нарушитель со средним потенциалом / Internal offender with medium potential	Высокая / High
		Внешний нарушитель с высоким потенциалом / External violator with high potential	Маловероятна / Unlikely
Угроза перехвата вводимой и выводимой на периферийные устройства информации / Threat of interception of information entered and output to peripheral devices	Данная угроза обусловлена недостаточностью мер защиты информации от утечки и контроля потоков данных, а также невозможностью осуществления защиты, вводимой и выводимой на периферийные устройства информации с помощью криптографических средств / The given threat is caused by insufficiency of measures of protection of the information from leak and the control of data flows, and also impossibility of realization of protection of the information entered and deduced on peripheral devices by means of cryptographic means	Внутренний нарушитель с низким потенциалом / Internal intruder with low potential	Высокая / High
		Внешний нарушитель с низким потенциалом / External offender with low potential	Высокая / High
Угроза перехвата привилегированного потока / Threat of interception of privileged flow	Угроза заключается в возможности осуществления нарушителем несанкционированного доступа к потоку данных, созданного приложением с дополнительными привилегиями / The threat consists in the possibility of the violator making unauthorized access to the data stream created by the application with additional privileges	Внутренний нарушитель со средним потенциалом / Internal offender with medium potential	Маловероятна / Unlikely
		Внешний нарушитель со средним потенциалом / External offender with medium potential	Средняя / Medium

Окончание табл. / End of table

1	2	3	4
Угроза перехвата исключения/ сигнала из привилегированного блока функций / Threat of intercepting an exception/ signal from a privileged function block	Угроза заключается в возможности нарушителя получить права на доступ к защищаемой информации путем перехвата исключений/ сигналов, сгенерированных участком программного кода, исполняемого с повышенными привилегиями / The threat lies in the ability of the infringer to gain access to the protected information by intercepting exceptions/signals generated by a piece of code run with elevated privileges	Внутренний нарушитель со средним потенциалом / Internal offender with medium potential	Средняя / Medium
		Внешний нарушитель со средним потенциалом / External offender with medium potential	Маловероятна / Unlikely
Угроза перехвата одноразовых паролей в режиме реального времени / Threat of intercepting one-time passwords in real time	Угроза заключается в возможности получения нарушителем управления критическими операциями пользователя путем перехвата одноразовых паролей, высылаемых системой автоматически, и использования их для осуществления неправомерных действий до того, как истечет их срок действия (5–7 мин) / The threat consists in the possibility of the violator getting control over critical user operations by intercepting one-time passwords sent automatically by the system and using them to carry out illegal actions before their expiry date expires (5–7 minutes)	Внешний нарушитель со средним потенциалом / External offender with medium potential	Средняя / Medium

Обсуждение и заключения

На основании представленного анализа сделаем следующие выводы.

1. Для всех известных угроз безопасности существует значительная вероятность их реализации.

2. Для компенсации рисков, связанных с реализацией представленных угроз, необходимо использовать дополнительные мероприятия и технические решения.

3. При проектировании систем управления освещением необходимо дополнительно руководствоваться стандартами в области информационной безопасности.

Минимальный объем мероприятий по обеспечению безопасного функционирования систем освещения должен

соответствовать требованиям регулятора¹⁰ и содержать следующие комплексы мер:

- идентификация и аутентификация субъектов доступа и объектов доступа;
- управление доступом субъектов доступа к объектам доступа;
- ограничение программной среды;
- защита машинных носителей информации;
- регистрация событий безопасности;
- антивирусная защита;
- обнаружение вторжений;
- контроль (анализ) защищенности информации;
- обеспечение целостности;
- обеспечение доступности;
- защита технических средств.

⁹ URL: <http://fstec.ru/normotvorcheskaya/poisk-po-dokumentam/110-tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/prikazy/864-prikaz-fstek-rossii-ot-14-marta-2014-g-n-31>



СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кузьминов К. Реализация «умных» сетей на базе компонентов PLC от Texas Instruments // Новости электроники. 2013. № 7. URL: <http://www.compel.ru/lib/ne/2013/7/7-realizatsiya-umnyih-setey-na-baze-komponentov-plc-ot-texas-instruments>
2. Девендран С., Мисра А., Мишра С. Источник питания для беспроводного диммера без использования нейтрали: типовая разработка и ее испытания // Новости электроники. 2017. № 2. С. 33–43. URL: https://www.terraelectronica.ru/files/news/NE_02_2017_s33.pdf
3. Кондратьев В. Связь по электрическим сетям: принципы, стандарты, приложения // Электронные компоненты. 2011. № 12. С. 40–44. URL: <http://ns1.russianelectronics.ru/leader-r/review/2327/doc/57948>
4. Зусев С. А. Использование проводных и беспроводных интерфейсов на энергетических объектах, на примере PLC-систем и беспроводного интерфейса ZigBee // Современные научные исследования и инновации. 2016. № 4. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/04/67031>
5. Колокольникова А. И., Карнаухов Д. В. Об автоматизированном контроле энергопотребления // Проблемы современной науки. 2013. № 8-1. С. 109–116. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19144150>
6. Применение PLC-технологий Yitran в системе управления блокировками безопасности распределительных устройств высокого напряжения / Р. К. Борисов [и др.] // Электричество. 2014. № 12. С. 18–23. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22490944>
7. Балаев А. А., Горбатов В. С., Сепашвили Д. Т. Тестирование безопасности PLC-технологии передачи данных // Безопасность информационных технологий. 2011. № 1. С. 57–60. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18813084>
8. Балаев А. А., Горбатов В. С. Методика аттестационных испытаний PLC-сетей на соответствие требованиям безопасности информации // Безопасность информационных технологий. 2012. № 1. С. 79–80. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18811100>
9. Методы обеспечения достоверности передачи информации в информационно-управляющих PLC-сетях предприятий / А. В. Щагин [и др.] // Информационные системы и технологии. 2014. Т. 83, № 3. С. 107–113. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21574904>
10. Шиков С. А. Проблемы информационной безопасности: интернет вещей // Вестник Мордовского университета. 2017. Т. 27, № 1. С. 27–40. DOI: 10.15507/0236-2910.027.201701.027-040

Поступила 19.10.2017; принята к публикации 20.12.2017; опубликована онлайн 20.03.2018

Об авторах:

Ивлиев Сергей Николаевич, заведующий кафедрой информационной безопасности и сервиса, Институт электроники и светотехники, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ResearcherID: E-1697-2014, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6101-3388>, ivliev_sn@mail.ru

Крылова Светлана Львовна, старший преподаватель кафедры информационной безопасности и сервиса, Институт электроники и светотехники, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ResearcherID: L-7324-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4083-9209>, svet711@yandex.ru

Шиков Станислав Александрович, аспирант, преподаватель кафедры информационной безопасности и сервиса, Институт электроники и светотехники, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ResearcherID: S-2514-2016, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8412-5163>, stenlav@mail.ru

Вклад соавторов:

С. Н. Ивлиев: научное руководство, разработка концепции модели угроз, анализ исходных данных; С. Л. Крылова: адаптация и актуализация модели угроз, построение адаптированной модели угроз с учетом требований регуляторов; С. А. Шиков: верстка статьи, подготовка графического материала, аналитическая обработка нормативной документации.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Computer science, computer engineering and management

REFERENCES

1. Kuzminov K. [Realization of “smart” networks based on PLC components from Texas Instruments]. *Novosti elektroniki* = Electronics News. 2013; 7. Available at: <http://www.compel.ru/lib/ne/2013/7/7-realizatsiya-umnyih-setey-na-baze-komponentov-plc-ot-texas-instruments> (In Russ.)
2. Devendran S., Misra A., Mishra S. [Power supply for wireless dimmer without neutral: Typical design and testing]. *Novosti elektroniki* = Electronics News. 2017; 2:33–43. Available at: https://www.terraelectronica.ru/files/news/NE_02_2017_s33.pdf (In Russ.)
3. Kondratyev V. [Communication on electrical networks: principles, standards, applications]. *Elektronnyye komponenty* = Electronic Components. 2011; 12:40–44. Available at: <http://ns1.russianelectronics.ru/leader-r/review/2327/doc/57948> (In Russ.)
4. Zusev S. A. Using the wired and wireless interfaces to energy facilities, the example of PLS systems and ZigBee wireless interface. *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii* = Modern Scientific Research and Innovations. 2016; 4. Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2016/04/67031> (In Russ.)
5. Kolokolnikova A. I., Karnaukhov D. V. Application of automated information data systems in domestic household. *Problemy sovremennoy nauki* = Problems of Modern Science. 2013; 8-1:109–116. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19144150> (In Russ.)
6. Borisov R. K., Kovalev D. I., Kokorin S. A., Kochurov O. M. [Application of Yitran PLC-technologies in the control system of safety locks of high voltage switchgears]. *Elektrichestvo* = Electricity. 2014; 12:18–23. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22490944> (In Russ.)
7. Balaev A. A., Gorbатов V. S., Sepashvili D. T. Safety testing of PLC-data transmission technology. *Bezopasnost informatsionnykh tekhnologiy* = Information Security. 2011; 1:57–60. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18813084> (In Russ.)
8. Balaev A. A., Gorbатов V. S. The problem of special research facilities PLC-networks in the validation tests for safety information is considered. *Bezopasnost informatsionnykh tekhnologiy* = Information Security. 2012; 1:79–80. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18811100> (In Russ.)
9. Shchagin A. V., Zo N. L., Lvin V. Ya., Khtut P. Kh. Methods of providing the reliability of information transmission in information-management PLC-networks of enterprises. *Informatsionnyye sistemy i tekhnologii* = Information Systems and Technologies. 2014; 83(3):107–113. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21574904> (In Russ.)
10. Shikov S. A. Problems of information security: Internet of Things. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2017; 1(27):27–40. DOI: 10.15507/0236-2910.027.201701.027-040 (In Russ.)

Submitted 19.10.2017; revised 20.12.2017; published online 20.03.2018

About the authors:

Sergey N. Ivliyev, Head of Information Security and Service Chair, Institute of Electronics and Lighting Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: E-1697-2014, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6101-3388>, ivliev_sn@mail.ru

Svetlana L. Krylova, Senior Lecturer, Information Security and Service Chair, Institute of Electronics and Lighting Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), ResearcherID: L-7324-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4083-9209>, svet711@yandex.ru

Stanislav A. Shikov, Lecturer, Information Security and Service Chair, Institute of Electronics and Lighting Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), ResearcherID: S-2514-2016, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8412-5163>, stenlav@mail.ru

Contribution of the co-authors:

S. N. Ivliyev: scientific leadership, developing the concept of the threat model, analysing the initial data; S. L. Krylova: adaptation and actualization of the threat model, construction of an adapted threat model taking into account the requirements of regulators; S. A. Shikov: layout of the article, preparation of graphic material, analytical processing of normative documentation.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.



Проектирование прототипа системы автоматизации деятельности совета многоквартирного дома в жилищно-коммунальной сфере

С. А. Фирсова*, Т. Е. Тепаева

ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

*karpushkinasa@yandex.ru

Введение. Низкое качество работы предприятий жилищно-коммунальной отрасли и услуг, предоставляемых ими, является одной из наиболее острых социальных проблем в современной России, тормозящих развитие экономики. Для предотвращения злоупотреблений в жилищно-коммунальной сфере в соответствии с Жилищным кодексом Российской Федерации собственники помещений могут избрать Совет многоквартирного дома, который осуществляет контроль за оказанием услуг и выполнением работ по управлению многоквартирным домом, а также представляет интересы жильцов. Выполнение поставленных перед Советом задач будет существенно упрощено и более эффективно при использовании современных программных систем, предназначенных для автоматизации деятельности в жилищно-коммунальной сфере. В связи с этим разработка, реализация и внедрение подобных систем является актуальной задачей.

Материалы и методы. В исследовании использовались поквартирные данные из квитанций на оплату жилищно-коммунальных услуг, а также информация, предоставляемая Государственной информационной системой жилищно-коммунального хозяйства. При создании прототипа программной системы был использован комплекс технологий и инструментов, состоящий из объектно-ориентированного языка Ruby, фреймворка Ruby on Rails, реляционной системы управления базами данных PostgreSQL, шаблонизатора Slim, расширения CSS Sass.

Результаты исследования. Был разработан прототип программной системы для автоматизации деятельности Совета, рассмотрена реализация дополнительных возможностей, не предусмотренных в подобных российских и зарубежных системах.

Обсуждение и заключения. Практическая значимость разработанного прототипа программной системы заключается в соответствии реализованных в нем функций целям и задачам, стоящим перед Советом и его председателем согласно ЖК РФ, а также применимости к решению других проблем, возникающих в ходе деятельности Совета.

Ключевые слова: жилищно-коммунальный комплекс, многоквартирный дом, совет многоквартирного дома, Ruby, PostgreSQL, автоматизация, Ruby on Rails

Для цитирования: Фирсова С. А., Тепаева Т. Е. Проектирование прототипа системы автоматизации деятельности совета многоквартирного дома в жилищно-коммунальной сфере // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 1. С. 95–119. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.095-119

Software Prototype Design for Managing Housing and Communal Services in Apartment Buildings

S. A. Firsova*, T. E. Tepaeva

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

*karpushkinasa@yandex.ru

Introduction. The paper presents the design and implementation of a computer program for the housing and utilities services. The Housing Code of the Russian Federation allows creating an apartment building council. The residents of a house choose the members this council to control providing services, manage an apartment building and represent their interests. The authors suggest using a special computer program for this purpose.

Materials and Methods. The authors used the qualitative analysis of the data obtained from house bills and from the State housing and communal sector information system. The data processing and software development were performed through using the Ruby object-oriented language, the Ruby On Rails framework, the PostgreSQL database management system, the Slim templating, and Sass CSS extensions.

Results. The authors developed a prototype software system to automate the activities of the apartment building council. This software helps to increase the quality of life of the apartment building residents.

Discussion and Conclusions. This research provides an information framework for improving the quality of utilities services. The results of this study can be applied to the solution of many problems of housing and utilities sector.

Keywords: housing and communal complex, apartment building, apartment building council, Ruby, PostgreSQL, automatization, Ruby on Rails

For citation: Firsova S. A., Tepaeva T. E. Software Prototype Design for Managing Housing and Communal Services in Apartment Buildings. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(1):95–119. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.095-119

Введение

В настоящее время в Российской Федерации осуществляется переход к информационному обществу в соответствии с государственной программой «Информационное общество (2011–2020 гг.)»¹. Среди основных положений программы особо выделена задача создания и развития

электронных сервисов в области жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ). Основные направления развития в этой области были отмечены в распоряжении Правительства РФ от 2 февраля 2010 г. № 102р², а Постановлением Правительства РФ от 23 сентября 2010 г. № 731³ – утверждены стандарты раскрытия информации организа-

¹ Постановление Правительства РФ от 15.04.2014 № 313 (ред. от 31.03.2017) «Об утверждении государственной программы Российской Федерации “Информационное общество (2011–2020 годы)”». URL: <http://base.garant.ru/70644220>

² Распоряжение Правительства РФ от 2 февраля 2010 г. № 102-р «Об утверждении Концепции федеральной целевой программы «Комплексная программа модернизации и реформирования жилищно-коммунального хозяйства на 2010–2020 годы». URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2207682>

³ Постановление Правительства РФ от 23 сентября 2010 г. № 731 «Об утверждении стандарта раскрытия информации организациями, осуществляющими деятельность в сфере управления многоквартирными домами» (с изм. и доп.). URL: <http://base.garant.ru/12179104/#ixzz4mW7AW100>



циями, осуществляющими деятельность в сфере управления многоквартирными домами (МКД).

Внедрение информационных технологий в деятельность предприятий ЖКХ позволяет формировать оперативную и достоверную информацию о состоянии данной отрасли, что делает возможным принятие эффективных решений, в частности, при регулировании стоимости жилищно-коммунальных услуг.

Обзор литературы

Перспективы и проблемы использования информационных технологий в сфере ЖКХ рассматривались многими российскими авторами. Так, в статьях [1–2] подробно описаны преимущества комплексного внедрения инновационного программного и аппаратного обеспечения; в работе [3] отмечено, что проникновение инновационных технологий в сферу ЖКХ должно осуществляться как по вертикали органов федеральной, региональной и муниципальной власти, так и по горизонтали организаций жилищно-коммунального комплекса. В работе [4] указана необходимость обеспечить реализацию таких бизнес-проектов как введение ERP- и CRM-систем, создание автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого учета энергоресурсов (АИИС КУЭ), создание центров информирования потребителей, расчетно-сервисных систем, информационных порталов и др.

В соответствии с Жилищным кодексом Российской Федерации (ЖК РФ), если в МКД не создано товарищество собственников жилья (ТСЖ) или данный дом не управляется жилищным кооперативом, жильцы на общем собрании обязаны избрать Совет МКД из числа собственников помещений в данном доме⁴. Совет МКД представляет собой некоммерческую

потребительскую организацию, объединяющую собственников недвижимого имущества для управления этим имуществом и обеспечения его эксплуатации.

За рубежом получили распространение и другие формы жилищной кооперации [4–5], однако проблемы и задачи, стоящие перед различными объединениями собственников жилья, в основном схожи, и их решению посвящены многие научные публикации. В статьях [6–7] на примере исследования МКД в Гонконге была проведена классификация коллективных действий владельцев квартир и рассмотрены оценки данных действий с целью эффективного управления собственностью. Выявлению факторов, определяющих готовность владельцев квартир к участию в коллективных действиях товарищества собственников жилья по управлению и обслуживанию объектов коммунальной инфраструктуры, посвящена работа [8].

Согласно ЖК РФ, Совет МКД выполняет следующие задачи:

- осуществляет контроль за оказанием услуг и выполнением работ по управлению МКД, содержанию и ремонту общего имущества в МКД, а также за качеством коммунальных услуг, предоставляемых собственникам помещений;

- выносит на общее собрание собственников вопросы о порядке пользования общим имуществом в МКД, порядке планирования и организации работ по содержанию и ремонту общего имущества в МКД;

- обеспечивает выполнение решений общего собрания собственников помещений в МКД;

- проверяет исполнение управляющей компанией договора с жильцами, взаимодействует с органами местного самоуправления, представляет интересы жильцов дома в суде;

⁴ Жилищный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 N 188-ФЗ (ред. от 28.12.2016) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2017). URL: <http://jkodeksrf.ru>

– представляет на утверждение годового общего собрания собственников помещений в МКД отчет о проделанной работе и т. д.

Очевидно, что выполнение поставленных задач будет существенно упрощено и более эффективно, если в своей работе Совет МКД использует современные программные комплексы, предназначенные для автоматизации деятельности в сфере жилищно-коммунальных услуг. Поэтому анализ существующих на современном российском рынке программных систем и разработка новых в целях усиления контроля за оказанием услуг и выполнением работ в МКД, предотвращения злоупотреблений в жилищно-коммунальной сфере, представления интересов жильцов и их непосредственном управлении МКД является актуальной задачей.

Основными программными системами, работающими в настоящее время в жилищно-коммунальной сфере в России, являются:

1) комплекты программных продуктов на базе платформ «1С: Предприятие 8» и «1С-Битрикс: Управление сайтом»;

2) государственная информационная система жилищно-коммунального хозяйства (ГИС ЖКХ).

Компания «1С» совместно с Центром разработки «1С: ВДГБ» и «1С-Битрикс» разработали комплекты программных продуктов на базе платформ «1С: Предприятие 8» и «1С-Битрикс: Управление сайтом», которые предназначены для создания и управления интерактивной информационной средой предприятия ЖКХ с целью организации эффективного управления данным предприятием. В них реали-

зована комплексная система взаимодействия предприятия ЖКХ или ТСЖ с получателями коммунальных услуг: поддерживается автоматизированный двусторонний обмен информацией между сайтом и информационной базой «1С» предприятия⁵.

ГИС ЖКХ гарантирует выполнение поручения Президента РФ от 13 октября 2011 г. № Пр-3081⁶ о создании единого информационного ресурса в целях получения доступа к информации в соответствии с действующими стандартами о деятельности организаций коммунального комплекса. ГИС ЖКХ является федеральной централизованной информационной системой, которая функционирует на основе технических и программных средств, а также информационных технологий, обеспечивающих сбор, обработку, хранение, предоставление, размещение и использование информации о жилищном фонде, стоимости и перечне услуг по управлению общим имуществом в МКД, работ по содержанию и ремонту общего имущества, предоставлении коммунальных услуг и поставке ресурсов, необходимых для предоставления коммунальных услуг, размере платы за жилое помещение и коммунальные услуги, задолженности по указанной плате, объектах коммунальной и инженерной инфраструктур [9]. Основные задачи, которые решает ГИС ЖКХ, приведены на соответствующем сайте⁷.

Условия успешного функционирования ГИС ЖКХ указываются в [10]. К ним относятся техническая возможность доступа к системе потенциальных потребителей услуг и сформированный необходимый уровень компетенций пользования электронными услугами у этих потребителей; достоверная,

⁵ 1С: Предприятие 8. Учет в управляющих компаниях ЖКХ, ТСЖ и ЖСК. URL: <http://solutions.1c.ru/catalog/jkh-tsj/materials>

⁶ Перечень поручений Президента Российской Федерации от 13 октября 2011 г. № Пр-3081. URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/13063>

⁷ Общие сведения о системе. URL: https://dom.gosuslugi.ru/webhelp/main/index.html#source/obshchiye_svedeniya_o_sisteme.html



полная и своевременная информация, содержащаяся в системе.

По состоянию на апрель 2017 г. представлены следующие статистические данные по использованию ГИС ЖКХ⁸:

- жилые дома (51 %);
- МКД (76 %);
- товарищества собственников жилья и кооперативы (75 %);
- ресурсоснабжающие организации (88 %);
- управляющие организации и государственные жилищные инспекции (100 %).

Согласно расчетам, вложения в ГИС ЖКХ должны окупиться в 2022–2023 гг., когда количество граждан и организаций, которые будут проводить через нее свои коммунальные платежи, достигнет такого уровня, что комиссии с уплачиваемых сумм будет достаточно для компенсации затрат на эксплуатацию данной информационной площадки.

Как отмечено в работе [11], полноценное развитие системы расчетов за ЖКУ с учетом дистанционных форм обслуживания возможно только при внедрении биллинговых технологий. Автором указаны преимущества применения таких технологий для потребителей услуг, ресурсоснабжающих организаций, организаций, осуществляющих управление МКД, и организаций, осуществляющих прием платежей. Примером биллинговой системы может служить решение Oracle Utilities Customer Care & Billing⁹, которое нашло широкое применение в российских и зарубежных организациях-поставщиках энергетических и коммунальных услуг.

Проблемы биллинга ЖКУ рассматриваются в статье [12]. Авторами предлагается измененная система биллинга, основанная на принципах участия и контроля процесса ресурсоснабжающими организациями в кооперации с администрациями муниципалитетов и, возможно, управляющими компаниями.

Кроме того, разработаны и успешно внедряются другие российские программные комплексы, назначение и основные характеристики которых приведены в работе [13].

Другие исследователи [14–15] приводят функциональные возможности и рассматривают области применения таких широко распространенных за рубежом информационных систем как HOA Management Software¹⁰, Buildium Property Management Software¹¹, Yardi Property Management Software¹², AppFolio Property Management Software¹³, которые используются как собственниками жилья, так и организациями по управлению недвижимостью. При этом авторы отмечают отличия условий и традиций управления недвижимостью в России и за рубежом. Зарубежные информационные системы имеют явную ориентацию на удобство работы собственника недвижимости и возможность его участия в процессе управления кондоминиумом или ассоциацией собственников жилья (homeowners associations) [16]. В России большинство информационных систем практически «исключают» собственников из контура управления ТСЖ, МКД или жилищного кооператива. Такие системы предназначены в основном для работы сотрудни-

⁸ Минкомсвязь России/События/Форум/Михаил Евраев: «ГИС ЖКХ станет действенным инструментом стратегического развития нашей страны». URL: <http://minsvyaz.ru/ru/events/36775>

⁹ Oracle utilities customer care and billing. URL: <http://www.oracle.com/us/industries/utilities/utilities-customer-care-billing-ds-2281135.pdf>

¹⁰ HOA Management software. URL: <https://www.condomanager.com>

¹¹ Buildium property management software. URL: <http://www.softwareadvice.com/property/buildium-property-manager-profile>

¹² Yardi property management software. URL: <http://www.yardi.com/services/document-library>

¹³ AppFolio property management software. URL: <https://www.appfolio.com>

ков бухгалтерии, паспортного стола, управляющей компании, технических служб и т. д.

Разработаны и успешно внедряются также узкоспециализированные программные системы, предназначенные для проведения количественного и качественного анализа потребляемых в МКД ресурсов с целью уменьшения коммунальных платежей.

В статье [17] проведен сравнительный анализ теоретического потребления тепла, вычисленного в программном комплексе Energie, и его реального потребления в МКД, определенного с помощью непрерывного мониторинга теплосчетчиков.

С помощью алгоритма оптимизации на основе смешанного целочисленного линейного программирования была построена модель, позволяющая минимизировать счета за электроэнергию при сохранении уровня комфорта потребителя [18]. Однако невыплаты являются одной из основных проблем, с которыми сталкиваются коммунальные предприятия по распределению электроэнергии. В работе [19] предложен метод, основанный на нечетком логическом подходе к вычислению индекса платежеспособности (Payment Capability Index); при этом возможно моделирование стратегий поведения потребителей и уменьшение риска неплатежей.

Другое исследование [20] объединило данные о потреблении воды в квартирах, характеристики форм собственности, метеорологические наблюдения и данные переписи населения для того, чтобы выявить детерминанты водопользования и, таким образом, правильно снабжать водой многоквартирные жилые комплексы.

Анализируя возможности существующих программных комплексов,

следует отметить отсутствие функций, предназначенных непосредственно для автоматизации деятельности Совета МКД и его председателя.

Материалы и методы

В качестве исходных данных, которые необходимы для функционирования программной системы, предназначенной для автоматизации деятельности Совета МКД, использовались поквартирные данные из квитанций на оплату ЖКУ, а также информация, предоставляемая ГИС ЖКХ.

Для реализации прототипа программной системы был использован комплекс технологий и инструментов, состоящий из:

- объектно-ориентированного языка Ruby, фреймворка Ruby On Rails, реляционной системы управления базами данных (СУБД) PostgreSQL (для написания backend-части системы);
- шаблонизатора Slim, расширения CSS Sass (для написания frontend-части системы).

Рассмотрим преимущества каждого элемента выбранного стека технологий.

Ruby позиционируется как динамический, рефлексивный, интерпретируемый высокоуровневый язык программирования, обладающий не зависимой от операционной системы реализацией многопоточности, строгой динамической типизацией, сборщиком мусора и многими другими возможностями¹⁴. Кроссплатформенная реализация интерпретатора языка полностью свободна. Ruby также является мультипарадигменным языком, поскольку поддерживает процедурный, объектно-ориентированный, функциональный стили¹⁵. Ruby on Rails – фреймворк, написанный на языке программирования Ruby, который реализует архитектурный шаблон Model-View-Controller (MVC) для веб-приложений, а также обеспечивает их интег-

¹⁴ Флэнаган Д., Мацумото Ю. Язык программирования Ruby / Пер. с англ. Н. Вильчинского. – 1-е изд. СПб. : Питер, 2011. 496 с.

¹⁵ Programming Ruby. The Pragmatic Programmer's Guide. URL: <http://ruby-doc.com/docs/ProgrammingRuby>



рацию с веб-сервером и сервером баз данных, является открытым программным обеспечением и распространяется под лицензией MIT¹⁶.

Ядром любой программируемой системы является база данных. В данном проекте было решено использовать PostgreSQL – свободную объектно-реляционную СУБД [21]. Лицензия PostgreSQL разрешает ее неограниченное использование, модификацию кода, а также включение в состав других продуктов, в том числе закрытых и коммерческих [22]. Кроме того, PostgreSQL сертифицирована как импортозамещающее программное обеспечение из раздела СУБД под товарным знаком PostgreSQL [23]. Достоинствами PostgreSQL считаются высокий уровень надежности при работе с критически важными данными; надежные механизмы обеспечения безопасности; высокопроизводительные механизмы транзакций; легкая расширяемость; развитый планировщик запросов [24].

Для создания frontend-части программной системы применялся последний стандарт HTML5, а также технологии Slim¹⁷, Sass (Syntactically Awesome Stylesheets)¹⁸.

Результаты исследования

Был разработан и реализован прототип программной системы, который позволяет автоматизировать основные задачи, выполняемые Советом МКД, а именно:

- ведение электронного журнала протоколов общих собраний собственников;
- управление электронной книгой учета жалоб и предложений жильцов МКД с возможностью обратной связи;
- ведение архива переписки Совета МКД с управляющей компанией, администрацией города, жилищной

инспекцией и другими инстанциями, включающего экземпляры всех направляемых от имени Совета документов и ответов на них;

– организация работы с другими материалами, появляющимися в ходе работы Совета МКД.

Кроме того, были внедрены дополнительные возможности, позволяющие более эффективно управлять некоторыми видами тарифов на ЖКУ, а именно:

1) тарифы на содержание общего имущества и текущий ремонт МКД на следующий период планирования бюджета МКД;

2) размер вознаграждения председателя МКД;

3) тариф за услуги и работы по управлению МКД управляющей компанией.

Перечисленные тарифы устанавливаются на общем собрании собственников помещений МКД и, таким образом, с помощью их регулирования можно избежать необоснованного повышения данных тарифов со стороны управляющих компаний.

Рассмотрим общие положения, на основе которых строится прототип программной системы.

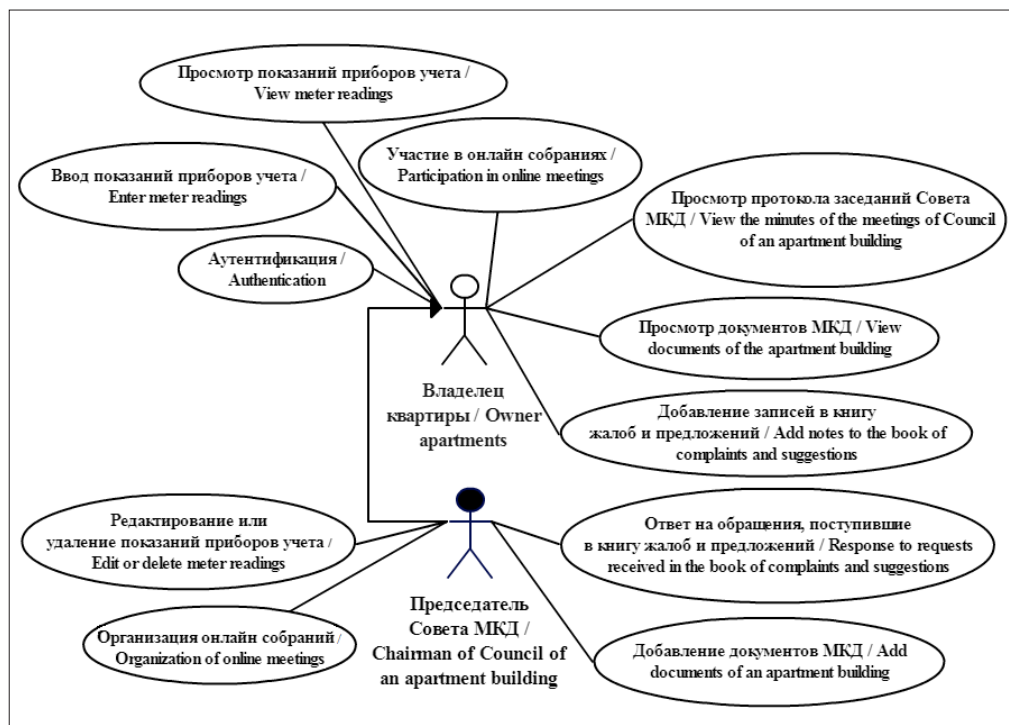
Функционал системы предполагает два типа ее пользователей: владелец квартиры и председатель Совета МКД; при этом варианты использования системы, соответствующие выполнению перечисленных выше основных функций Совета МКД, приведены на рис. 1.

Программную архитектуру системы удобно представить с помощью диаграммы компонентов – UML-диаграмм, которые описывают особенности представления системы с различных точек зрения.

¹⁶ Hartl M. Ruby on Rails tutorial. – 3rd ed. Addison-Wesley, 2015. 664 p.

¹⁷ Documentation – Slim framework. URL: <https://www.slimframework.com/docs>

¹⁸ Sass and compass in action / W. Netherland [et al.] // Manning Publications. 2013. 300 p. URL: <https://www.manning.com/books/sass-and-compass-in-action>



Р и с. 1. Диаграмма вариантов использования

F i g. 1. The diagram for ways of using

Диаграммы последовательностей отражают взаимодействия между линиями жизни каких-либо объектов (создание, деятельность, уничтожение). В структуре системы можно выделить два ключевых слоя – frontend и backend. Они имеют отличия, относящиеся к разделению ответственности между уровнем доступа к данным и уровнем представления. Реализация базовых прецедентов системы основывается на взаимодействии пользователя через слой frontend с данными, формируемыми в слое backend. Диаграммы последовательностей для прецедентов, необходимых для реализации основных функций системы, будут представлены ниже.

Ядром любой программируемой системы является база данных. На основе анализа предметной области строится ER-модель (Entity Relationship Model) базы данных, которая позволяет опи-

сывать схемы предметной области. При этом для каждой сущности системы, хранящейся в базе данных, требуется создать таблицу и обеспечить наличие необходимых связей. На основании ER-модели и выбранной СУБД описывается и создается схема базы данных, а затем – программная оболочка системы. ER-диаграммы, необходимые для реализации основных функций системы, будут рассмотрены ниже.

В основе архитектуры сервера разработанного прототипа программной системы лежит паттерн проектирования MVC (Model отвечает за организацию доступа к данным и манипуляций с ними, View отвечает за форму отображения данных, Controller организует взаимодействие между пользователем и системой) – схема разделения программной системы на 3 отдельных компонента таким образом,

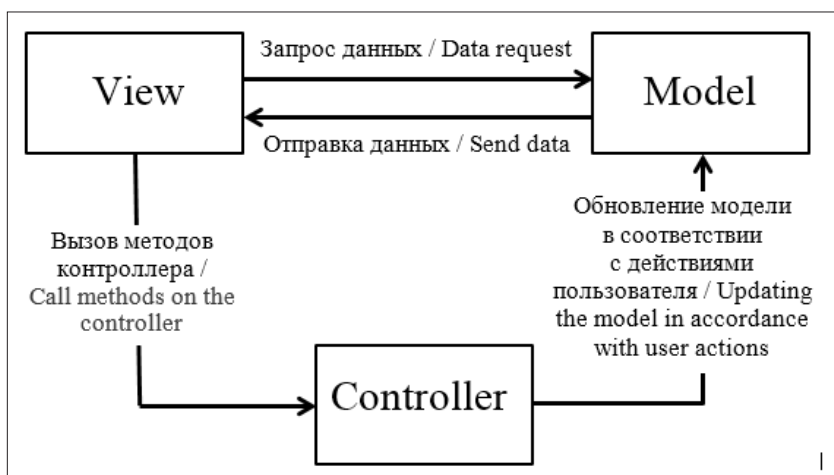


чтобы изменение одного компонента оказывало наименьшее воздействие на остальные (рис. 2). Более подробно остановимся на рассмотрении функций, которые реализуют расчет тарифов 1–3, описанных выше.

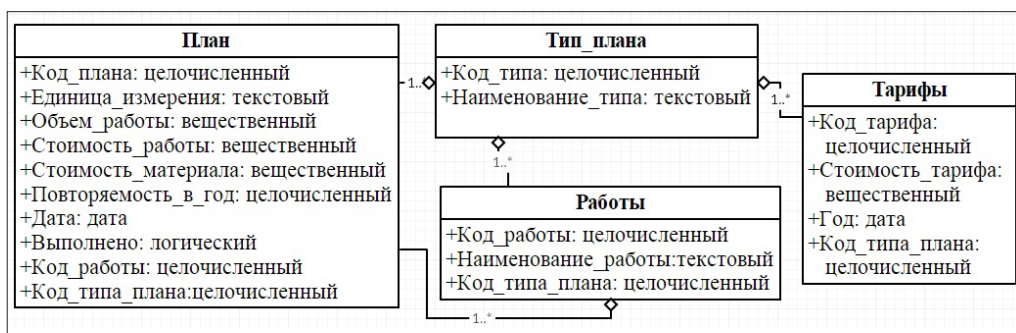
Для определения тарифов по статьям «Содержание общего имущества в МКД» и «Текущий ремонт общего имущества в МКД» на следующий год составляются планы работ, после чего полученные суммы, необходимые для

реализации этих планов, делятся на общую площадь жилых помещений дома.

В прототипе программной системы для хранения названий работ была создана таблица «Job», для хранения тарифов для 1 кв. м площади квартир – таблица «ApartmetTariff», для хранения названия плана (содержание общего имущества или ремонт дома) – «Plan-Ture», для хранения информации в плане – «Plan» (рис. 3).



Р и с. 2. Паттерн MVC
F i g. 2. The MVC pattern



Р и с. 3. Таблицы, необходимые для реализации функции определения тарифов на содержание и текущий ремонт общего имущества МКД на следующий год

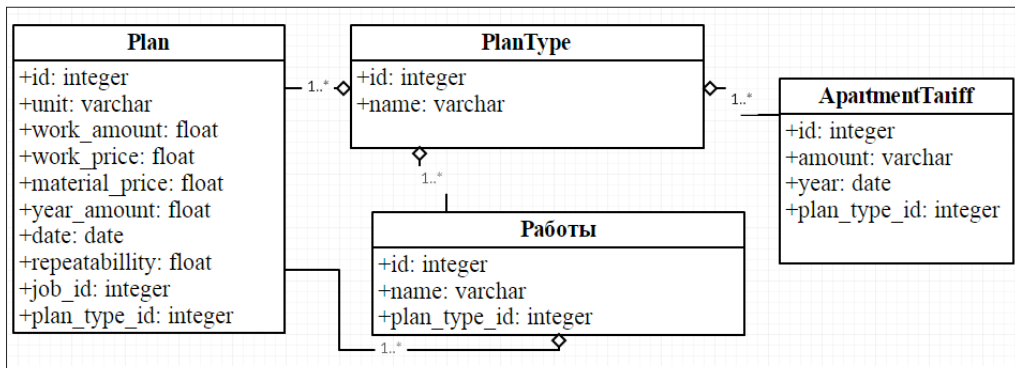
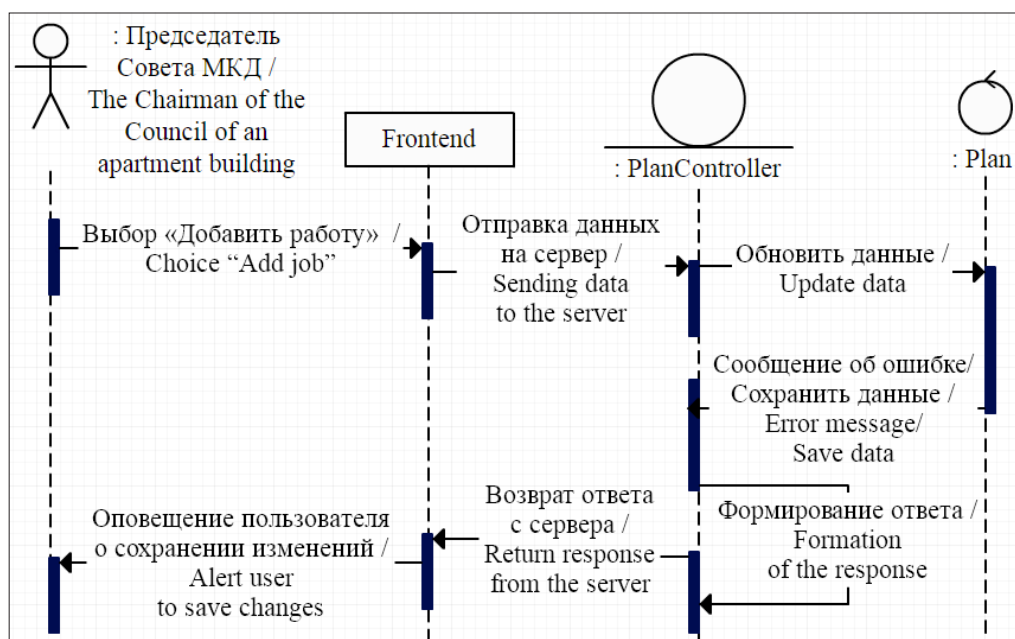


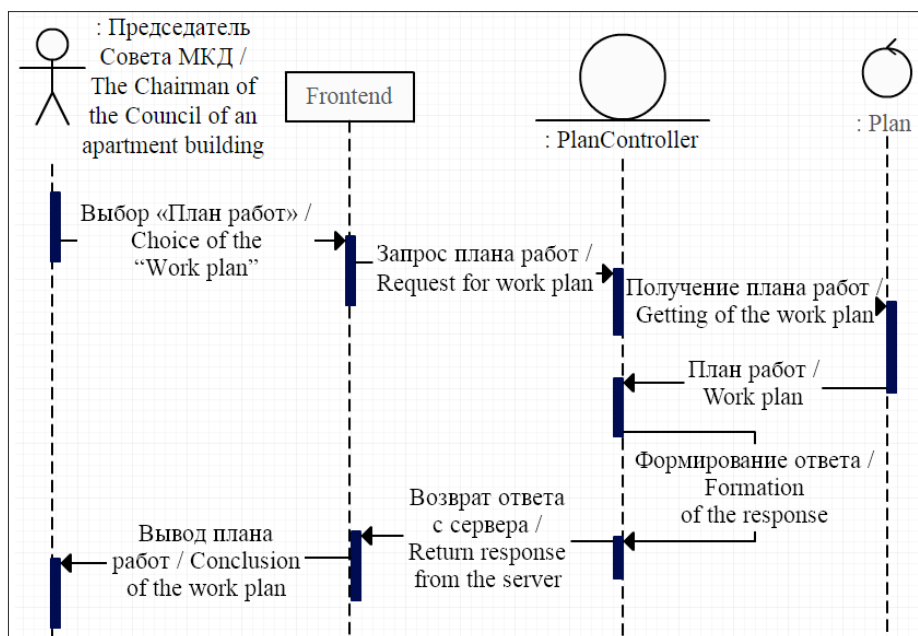
Fig. 3. The tables needed to implementing the function of determining tariffs for the maintenance and repair of communal facilities of an apartment building for the next year

Диаграммы последовательностей для функции «Определение тарифов на содержание и текущий ремонт общего имущества в МКД на следующий год» представлены на рис. 4–5.



Р и с. 4. Диаграмма последовательностей для прецедента «Добавление работ, входящих в план по содержанию и текущему ремонту общего имущества МКД на следующий год»

Fig. 4. The sequence diagram for the precedent “The addition to the works included in the plan for maintenance and current repairs of communal facilities of an apartment building for the next year”



Р и с. 5. Диаграмма последовательностей для прецедента «Расчет плана работ и вывод тарифов на содержание и текущий ремонт общего имущества МКД на следующий год»

F i g. 5. The sequence diagram for the precedent “The calculation of the work plan and the withdrawal of tariffs for the maintenance and repair of communal facilities of an apartment building the next year”

На рис. 6–7 представлен пример общего имущества в МКД на следующий год, и вывод сформированного по содержанию и текущему ремонту плана.

ВВОД ВИДОВ РАБОТ ПО СОДЕРЖАНИЮ ОБЩЕГО ИМУЩЕСТВА МКД / THE ENTRY OF THE MAINTENANCE OF COMMON PROPERTY				
Наименование работы / Name of work	Ед. изм. / Unit of measure	Объем работ / Volume of works	Повторяемость в год / The number of times per year	Стоимость работ на ед. изм. / The cost of work per unit
Подметание лестнич- ных площадок и маршей нижних трех этажей / Sweeping of ladder platforms and marches of the lower	м ²	232,62	247	1,14
Подметание лестнич- ных площадок и маршей выше третьего этажа / Sweeping of ladder	м ²	232,62	247	1,14

Добавить / Add
Удалить / Delete
Редактировать / Edit

СФОРМИРОВАТЬ ОТЧЕТ / GENERATE A REPORT

Р и с. 6. Пример ввода видов работ, входящих в план по содержанию общего имущества МКД

F i g. 6. The example of the types of works included in the plan content of communal facilities of an apartment building

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛУГ И РАБОТ, необходимых для обеспечения надлежащего состояния общего имущества в МКД / THE LIST OF SERVICES AND WORKS necessary to ensure the proper condition of common property in apartment buildings						
№ п/п	Наименование услуг и работ / Name of services and works	Ед. изм. / Unit of measure	Объем работ / Volume of works	Повторяемость в год / The frequency of occurrence per year	Стоимость на ед. изм., руб. / The cost per unit, rub.	Общая стоимость, руб. / The total cost, rub.
1	Подметание лестничных площадок и маршей нижних трех этажей / Sweeping of ladder platforms and marches of the lower three floors	м ²	232,62	247	1,14	65 501,14
2	Подметание лестничных площадок и маршей выше третьего этажа / Sweeping of ladder platforms and marches above the third floor	м ²	155,08	247	0,87	33 325,14
3	Влажное подметание лестничных площадок и маршей нижних трех этажей / Damp sweeping of ladder platforms and marches of the lower three floors	м ²	232,62	48	1,14	12 728,97
...						
ИТОГО / TOTAL						290 368,62
Тариф на содержание общего имущества МКД / The tariff for the maintenance of common property						7,09

Р и с. 7. Вывод сформированного плана работ по содержанию общего имущества и расчет тарифа на содержание общего имущества МКД

F i g. 7. The plan of the maintenance of the common property and the calculation of the tariff for the maintenance of communal facilities of an apartment building

Таким образом, тарифы на содержание и текущий ремонт МКД на следующий год рассчитаны на основании планов работ и услуг; затем их утверждение может быть вынесено на общее собрание собственников.

Рассмотрим подходы и методики, лежащие в основе определения размера вознаграждения председателя МКД и тарифа за услуги и работы по управлению МКД управляющей компании.

В статьях [25–27] предложены различные методики оценки эффективности работы управляющих компаний. В разработанной программной системе использовалась утвержденная Фондом содействия реформированию ЖКХ «Методика оценки эффективности деятельности управляющих организаций, товариществ собственников жилья, жилищных кооперативов и иных специализированных потребительских кооперативов»¹⁹, в которой были предложены

¹⁹ Методика оценки эффективности деятельности управляющих организаций, товариществ собственников жилья, жилищных кооперативов и иных специализированных потребительских кооперативов. URL: <http://gkhkontrol.ru/2013/02/11557>



показатели по 5-и основным направлениям: масштаб деятельности, финансовая устойчивость, эффективность, репутация, прозрачность. Полученные показатели суммируются, после чего управляющей организации присваивается рейтинг в соответствии с таблицей, разработанной Фондом содействия реформированию ЖКХ. Пример расчета такого рейтинга приведен в работе [28].

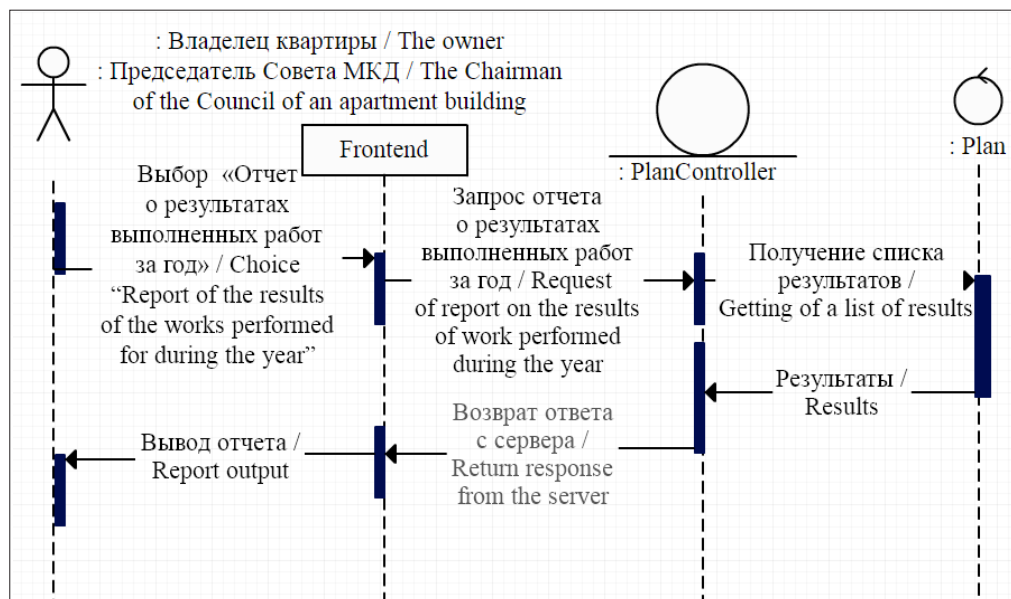
Рассмотрим реализацию расчета показателя «Объем выполненных работ по ремонту и модернизации», входящего в направление «Эффективность деятельности». Диаграммы последовательностей для этой функции представлены на рис. 8–9.

На рис. 10–11 представлен пример определения фактически выполненных работ по текущему ремонту общего имущества в МКД за прошедший год и вывод процента выполненных работ управляющей компанией.

Таким образом, управляющая компания по показателю «Объем выполненных работ по ремонту и модернизации» выполнила только 60 % запланированных работ, что позволяет Совету МКД выносить вопрос о снижении тарифа «Услуги и работы по управлению в МКД» на общее собрание собственников помещений.

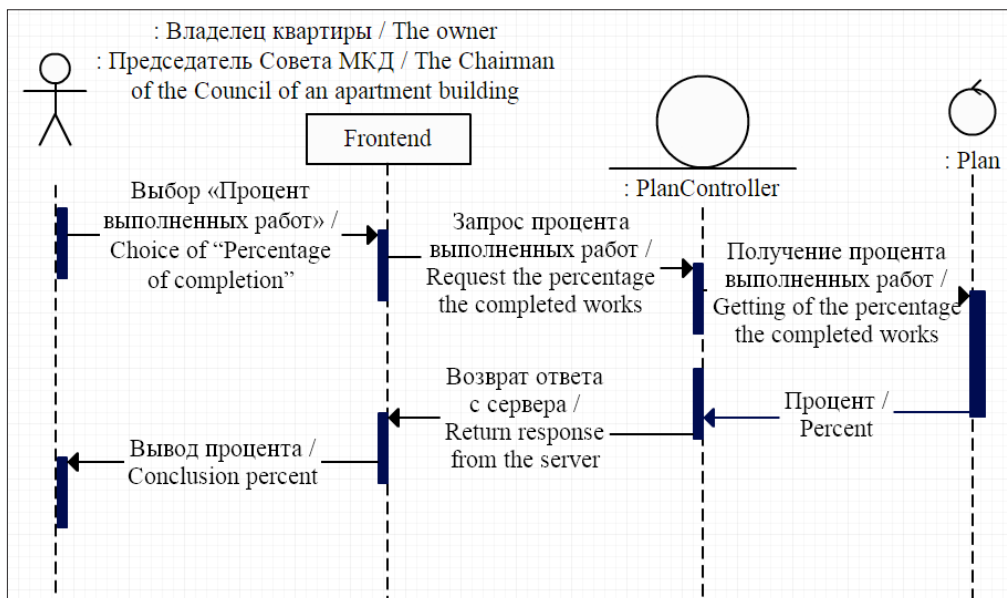
Заметим, что проблема анализа эффективности работы управляющих компаний рассматривается и в работах различных зарубежных авторов. Так, в статье [29] эффективность управляющих компаний предлагается оценивать с использованием логической модели, в которой в качестве концептуальной основы используется система показателей, адаптированных от схемы индекса качества строительства.

В ЖК РФ права и обязанности Совета МКД и его председателя регламентированы Статьей 161.1 (п. 5–8).



Р и с. 8. Диаграмма последовательностей для прецедента «Формирование отчета о выполненных работах по ремонту и модернизации»

F i g. 8. The sequence diagram for the precedent "Generating a report on the executed repair and modernization"



Р и с. 9. Диаграмма последовательностей для прецедента «Получение процента выполненных работ управляющей компанией по ремонту и модернизации»

F i g. 9. The sequence diagram for the precedent "Getting a percentage of the work performed by the management company for repair and modernization"

ВЫПОЛНЕННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕКУЩЕМУ РЕМОНТУ ОБЩЕГО ИМУЩЕСТВА МКД ЗА 2016 ГОД / PERFORMED WORKS ON CURRENT REPAIR OF COMMON PROPERTY FOR THE YEAR 2016				
Наименование работы / Name of work	Ед. изм. / Unit of measure	Объем работ / Volume of works	Стоимость материала на ед. измерения / The cost of material per unit	Стоимость работ на ед. изм. / The cost of work per unit
Ремонт лестничных клеток в подъездах / Repair stairwells in the hallways	<i>по плану / on a plan</i>			
	подъезд	4	10 462,78	10 462,78
	<i>фактически / actually</i>			
	подъезд	3	10 462,78	10 462,78
Установка окон ПВХ / Window installation PVC	<i>по плану / on a plan</i>			
	шт.	12		11 000,00
	<i>фактически / actually</i>			
	шт.			

Добавить / Add
Удалить / Delete
Редактировать / Edit

СФОРМИРОВАТЬ ОТЧЕТ / GENERATE A REPORT

Р и с. 10. Определение фактически выполненных работ по текущему ремонту общего имущества МКД за прошедший год

F i g. 10. The estimation of actually executed works on maintenance of communal facilities of an apartment building over the past year



ОТЧЕТ О ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТАХ ПО ТЕКУЩЕМУ РЕМОНТУ МКД ЗА 2016 г. / THE REPORT ON THE WORK PERFORMED FOR THE CURRENT REPAIRS OF AN APARTMENT BUILDING FOR 2016						
№ п/п	Наименование услуг и работ / Name services and works	Ед. изм. / Unit of measure	Объем работ / Volume of works	Стоимость материала на ед. изм., руб. / The cost of material per unit, rub.	Стоимость на ед. изм., руб. / The cost per unit, rub.	Общая стоимость, руб. / The total cost, rub.
1	Ремонт лестничных клеток в подъездах / Repair stairwells in the hallways	Подъезд / House entrance	3	10 462,78	15 4437,22	194 700,00
2	Промывание системы отопления / Flushing of the heating system	Объем здания / The volume of the building	14 967		1,24	18 559,08
3	Гидравлическое испытание / Hydraulic testing	м ²	1 545		10,47	16 176,15
4	Разглушка системы отопления / Raspushku heating system	шт.	2		169,19	324,38
...						
ИТОГО / TOTAL						292 423,02
Процент выполнения работ относительно плана / The percentage of completion of work on the plan						60 %

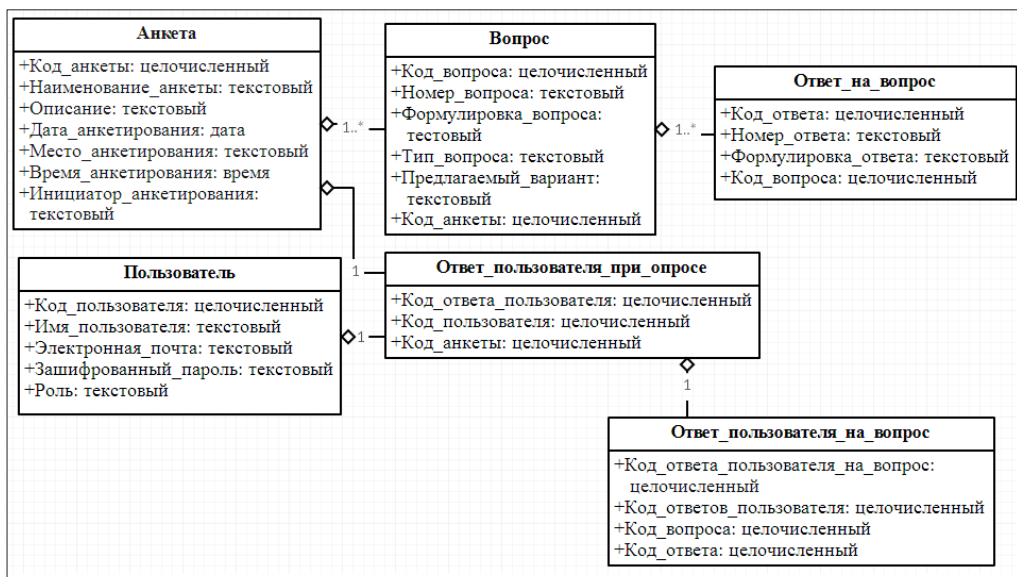
Р и с. 11. Вывод сформированного отчета выполненных работ по текущему ремонту общего имущества МКД за прошедший год

Fig. 11. The output of the generated report of completed maintenance of communal facilities of an apartment building over the past year

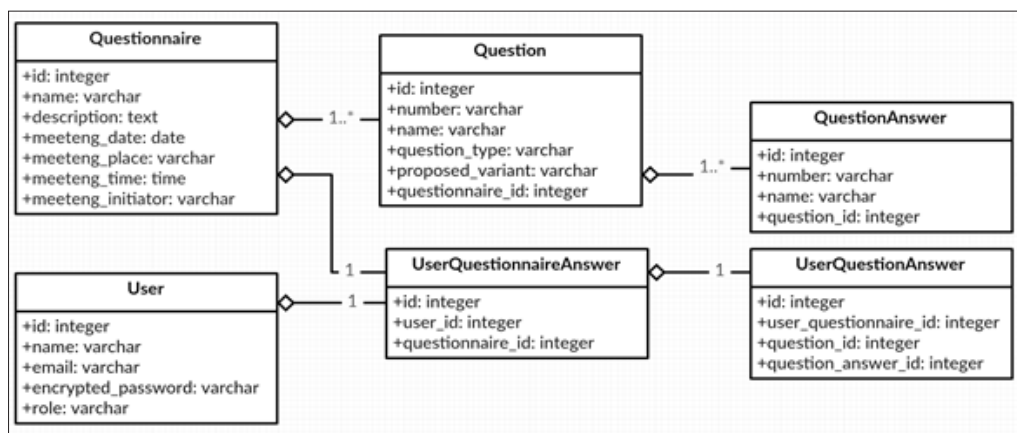
Однако по данному документу затруднительно провести оценку деятельности председателя Совета МКД и, таким образом, определить размер вознаграждения за его работу. Поэтому для данной цели было решено использовать социологические показатели, базирующиеся на результатах выборочного анкетного опроса собственников помещений, проживающих в МКД. Основой анкетного опроса послужило комплексное социологическое исследование, в котором были изучены технологии и механизмы взаимодействия советов МКД с собственниками и проанализированы такие факторы социального ка-

питала как уровень межличностного доверия и готовность собственников МКД участвовать в управлении домом [30].

Для хранения информации о результатах анкетного опроса в программной системе были созданы таблицы «Questionnaire», «UserQuestionnaireAnswer», «UserQuestionAnswer», «Question», «QuestionAnswer» (рис. 12). Общая информация об анкете хранится в таблице «Questionnaire», информация о каждом вопросе – в «Question», варианты ответа на каждый вопрос – в «QuestionAnswer», ответы пользователя на анкеты – в «UserQuestionnaireAnswer» и «UserQuestionAnswer» соответственно.

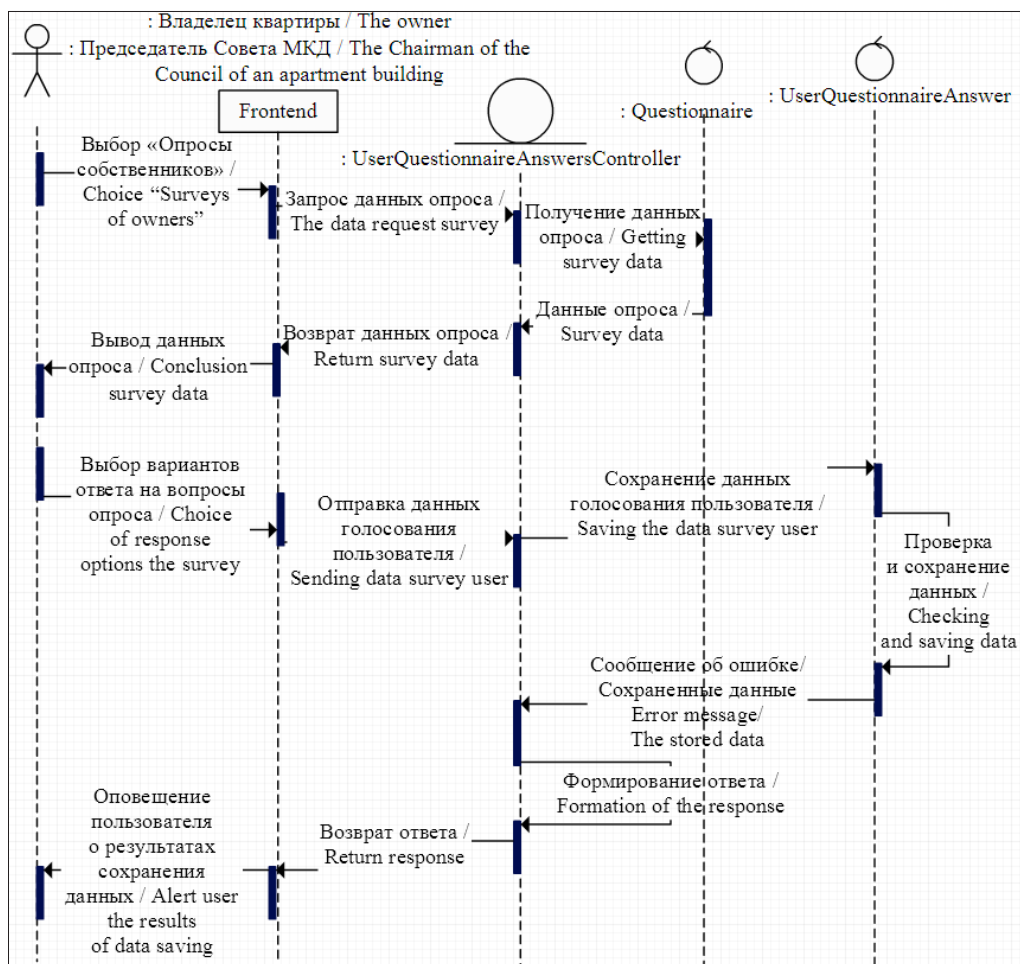


Р и с. 12. Таблицы, необходимые для реализации функции онлайн опроса собственников



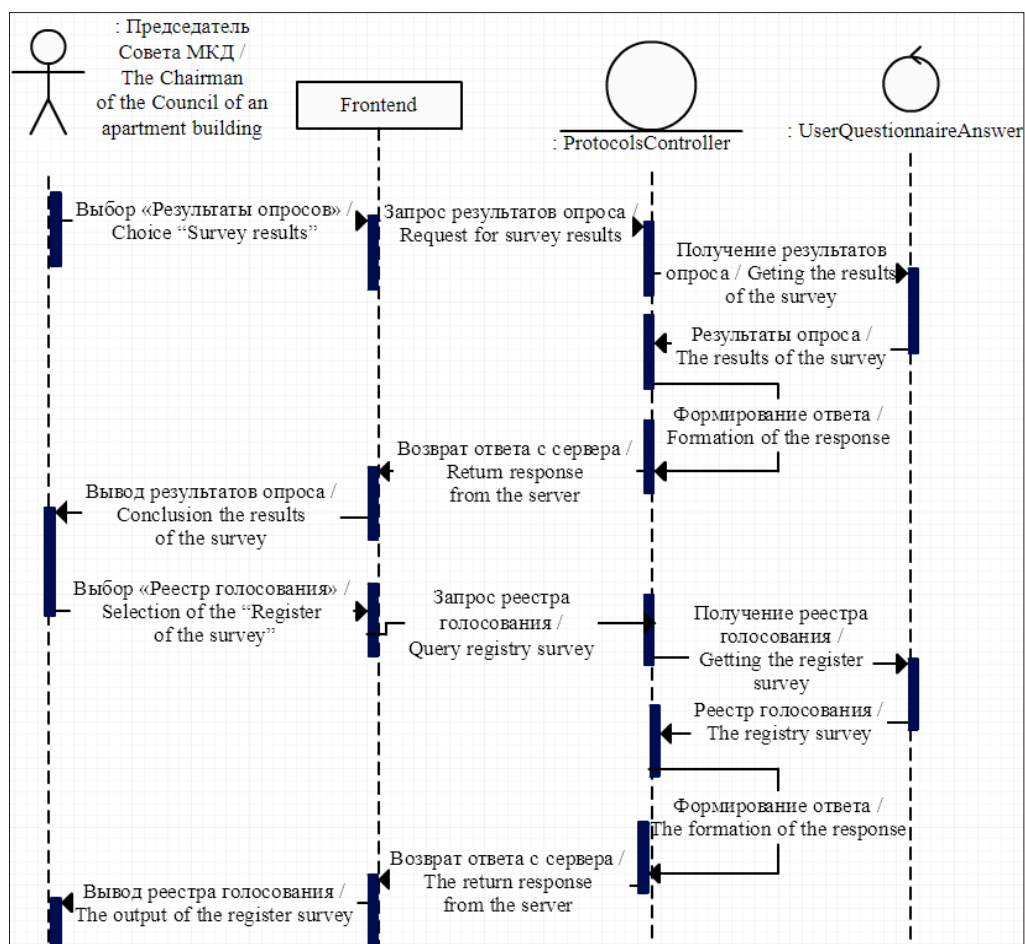
F i g. 12. The tables for implementing the functions of the online survey of owners

Диаграммы последовательностей для функции «Реализация онлайн опроса собственников» представлены на рис. 13–14.



Р и с. 13. Диаграмма последовательностей для прецедента «Участие в онлайн опросе»

F i g. 13. The sequence diagram for the precedent "Participation in an online survey"



Р и с. 14. Диаграмма последовательностей для прецедента
«Просмотр результатов онлайн опроса»

F i g. 14. The sequence diagram for the precedent "View results online survey"

На рис. 15–16 представлены примеры заполнения анкеты и результаты онлайн опроса, по которым можно подготовить предложения о выплате вознаграждения председателю МКД и его размере.

В настоящее время созданный прототип программной системы проходит апробацию в МКД г. Саранска Республики Мордовия (РМ), где председателем Совета МКД является автор статьи. Благодаря использованию прототипа удалось в течение двух по-

следних лет перейти на низкие для РМ и при этом экономически обоснованные тарифы по статьям «Содержание общего имущества в МКД» – 4,73 руб./м², «Текущий ремонт общего имущества в МКД» – 7,14 руб./м², «Услуги и работы по управлению в МКД» – 3,4 руб./м². Кроме того, достигнутая автоматизация работы по исполнению обязанностей председателя Совета МКД позволила освободить его от рутинной работы, связанной с формированием отчетных документов и ведением раз-



ОНЛАЙН ОПРОС СОБСТВЕННИКОВ / ONLINE SURVEY OF OWNERS

1. Каким образом Вы участвуете в управлении своим домом? / How are you involved in running your home?

- ☒ Принимаю решения на общих собраниях собственников помещений / I make decisions at General meetings of owners
- ☐ Участвую в различных мероприятиях в доме / I participate in various activities at the house
- ☐ Не участвую / I do not participate

2. Знаете ли Вы членов Совета вашего дома? / Do you know the members of Council of an apartment building?

- ☒ Да / Yes ☐ Знаю, но не всех / I know, but not all ☐ Нет / No

3. Пользуется ли Совет МКД доверием собственников? / Does the Council of an apartment building trust of the owners?

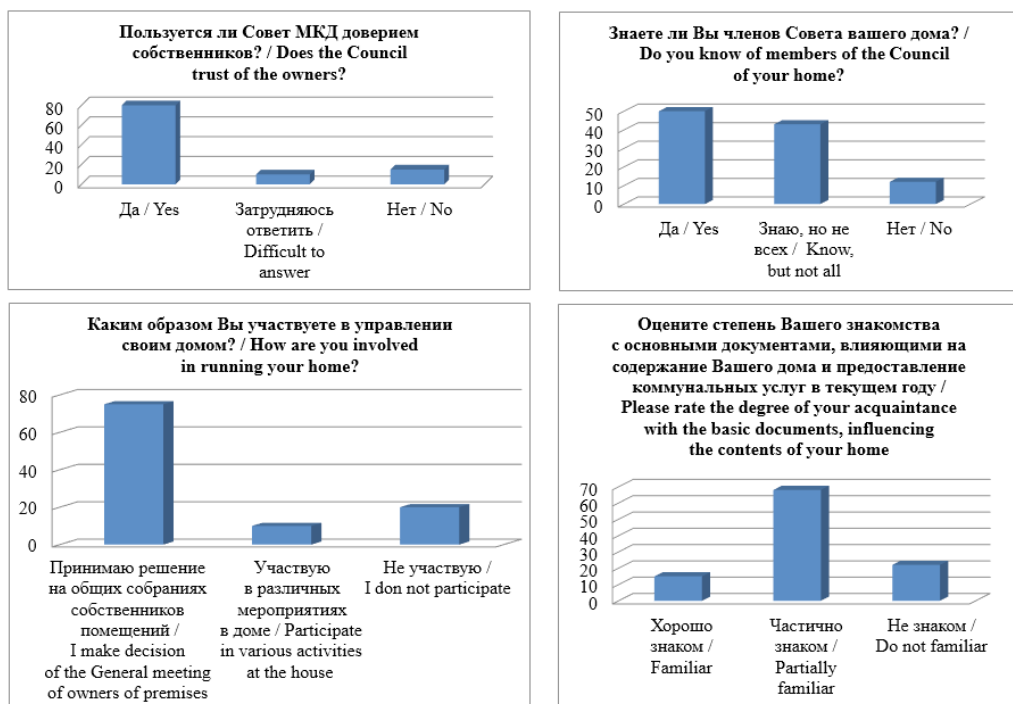
- ☒ Да / Yes ☐ Затрудняюсь ответить / Difficult to answer ☐ Нет / No

4. Оцените степень Вашего знакомства с основными документами, влияющими на содержание Вашего дома и предоставление коммунальных услуг в текущем году / Please rate the degree of your acquaintance with the basic documents, influencing the contents of your home and the provision of public services in the current year:

	Да / Yes	Частично знаком / Partially	Нет / No
Смета доходов от использования общего имущества / Estimates of revenues from the use of the common property	☒	☐	☐
Смета расходов на содержание общего имущества / The cost estimates for the maintenance of common	☒	☐	☐
Смета на проведение текущего ремонта общего имущества / Estimates for repairs of the common property	☒	☐	☐
План текущего ремонта общего имущества / The plan for the current repair of the common property	☒	☐	☐
Акт осмотра общего имущества в текущем году / An inspection of the common property in the current year	☒	☐	☐
Акт состояния дома на предмет капремонта / The act of condition of the house on the subject of a major overhaul	☒	☐	☐
Тарифы и нормативы предоставления коммунальных услуг / The tariffs and regulations of public services	☒	☐	☐

ОТПРАВИТЬ / SEND

Р и с. 15. Пример заполнения анкеты онлайн опроса
F i g. 15. The example of filling in the questionnaire online survey



Р и с. 16. Результаты онлайн опроса
F i g. 16. The results of the online survey

личных журналов, следствием чего стал достаточно низкий тариф по статье «Вознаграждение председателя МКД» – 1,3 руб./м². Также в связи с переходом к онлайн голосованиям при проведении общих собраний собственников жилья был отмечен значительный рост числа собственников, принимающих участие в таких собраниях и, следовательно, в управлении домом (с 63 % в 2016 г. до 94 % в середине 2017 г.), что способствует прозрачности расходования собранных средств и, в итоге, более эффективному распределению денежных потоков.

Обсуждение и заключения

В статье описывается разработанный авторами прототип программной системы для автоматизации деятельности Совета МКД в жилищно-ком-

мунальной сфере. Создание такой системы является актуальным, поскольку она позволяет контролировать качество выполняемых работ по дому, проверять исполнение управляющей компанией договора с жильцами, представлять интересы жильцов и предотвращать злоупотребления со стороны управляющих компаний.

Как показал анализ существующих систем в сфере ЖКУ, они не в полной мере автоматизируют весь комплекс работ по управлению МКД. В представленной системе реализованы дополнительные возможности, которые не предусмотрены в других системах: выбор способа начисления платы за общедомовое имущество, автоматическое генерирование протоколов общих собраний собственников, расчет тарифов на содержание общего имущества



и текущий ремонт МКД на следующий период планирования бюджета МКД, определение размера вознаграждения председателю МКД и тарифа за услуги и работы по управлению МКД управляющей компании.

Практическая значимость разработанного прототипа заключается в соответствии реализованных в нем функций целям и задачам, стоящим перед Советом МКД и его председателем согласно ЖК РФ, а также применимости к решению других реальных проблем, возникающих в ходе деятельности Совета МКД.

Следующим этапом развития прототипа может быть его интеграция с Государственной информационной системой ЖКХ в соответствии с Регламентом информационного взаимодействия ГИС ЖКХ с внешними информационными системами²⁰, который определяет правила и основные процедуры, связанные с процессами приема и передачи информации в электронной форме по телекоммуникационным каналам; кроме того, в Альбоме ТФФ²¹ определены требования к форматам таких электронных сообщений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Рахимова М. А.** Внедрение информационно-расчетных технологий – основа развития системы ЖКХ // Вестник Таджикского государственного университета права, бизнеса и политики (Сер. «Общественные науки»). 2016. Т. 66, № 1. С. 136–144. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-informatsionno-raschetnyh-tehnologiy-osnova-razvitiya-sistemy-zhkh>
2. **Якименко И. А., Козин И. Ю., Медведев Е. В.** Внедрение информационных технологий в деятельность предприятий ЖКХ // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика (Сер. «Экономика»). 2015. Т. 11, № 1. С. 171–174. <https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-informatsionnyh-tehnologiy-v-deyatelnost-predpriyatiy-zhkh>
3. **Кирсанов С. А., Истомин Е. П., Мамедов З. Ф.** Применение информационных технологий в жилищно-коммунальном хозяйстве // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2014. № 3. С. 99–109. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22600347>
4. **Алиева Ж. М.** Зарубежный опыт государственно-частного партнерства в сфере финансового обеспечения объектов жилищно-коммунального хозяйства // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 763–769. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25324234>
5. **Грачёва И. И.** Зарубежный опыт организации и регулирования сферы ЖКХ // Концепт : научно-методический электронный журнал. 2014. Т. 20. С. 4241–4245. URL: <http://e-koncept.ru/2014/55113.htm>
6. **Gao W.** Collective actions for the management of multi-owned residential building: a case of Hong Kong // Habitat International. 2015. Vol. 49. P. 316–324. DOI: 10.1016/j.habitatint.2015.06.008
7. **Ho D. C. W., Gao W.** Collective action in apartment building management in Hong Kong // Habitat International. 2013. Vol. 38. P. 10–17. DOI: 10.1016/j.habitatint.2012.09.001
8. **Yau Y.** Willingness to participate in collective action: the case of multiowned housing managment // Journal of Urban Affairs. 2013. Vol. 35, no. 2. P. 153–171. DOI: 10.1111/j.1467-9906.2012.00621.x
9. **Бодров К. В.** Использование государственной информационной системы жилищно-коммунального хозяйства в Российской Федерации // Государственное и муниципальное управление в XXI веке: теория, методология, практика. 2016. № 24. С. 70–75. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26552808>

²⁰ Государственная информационная система жилищно-коммунального хозяйства (ГИС ЖКХ). Регламент информационного взаимодействия внешних информационных систем с ГИС ЖКХ. URL: <https://dom.gosuslugi.ru/#!/regulations?userCtgCode=1>

²¹ ГИС ЖКХ. Альбом ТФФ. Требования к форматам и способам передачи информации по телекоммуникационным каналам связи в рамках интеграционного взаимодействия ГИС ЖКХ со смежными системами. URL: <https://dom.gosuslugi.ru/filestore/publicDownloadServlet?context=publiccontent&uid=46a47b45-a39e-4841-a873-fcca4ad03782>

10. **Минаев В. А., Биргер Е. В.** Сетевые коммуникационные технологии в жилищно-коммунальном хозяйстве // Сервис в России и за рубежом. 2014. Т. 51, № 4. С. 130–139. DOI: 10.12737/4858
11. **Мартенс А. А.** Развитие системы расчетов за жилищно-коммунальные услуги как тренд продвижения банковского бизнеса // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2016. Т. 296, № 14. С. 49–62. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/razvitie-sistemy-raschetov-za-zhilischno-kommunalnye-uslugi-kak-trend-prodvizheniya-bankovskogo-biznesa>
12. **Макарова И. В., Максимов А. Д.** Биллинг жилищно-коммунальных услуг: проблемы и решения // Российское предпринимательство. 2012. № 9. С. 109–112. URL: <https://creativeconomy.ru/lib/7482>
13. К вопросу о современном уровне автоматизации в ЖКХ / А. В. Демидов [и др.] // Успехи современной науки и образования. 2016. Т. 4, № 9. С. 187–190. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26719818>
14. **Ерис Е. Е., Сибиря А. И.** Функциональные возможности информационной системы Total Management // Постулат. 2017. Т. 15, № 1. С. 6–11. URL: <http://e-postulat.ru/index.php/Postulat/article/view/329/347>
15. **Телемтаев М. М., Попов А. А.** Анализ информационных систем, используемых за рубежом организациями по управлению недвижимостью и собственниками (арендаторами) жилья // Известия Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова. 2012. Т. 6, № 1. С. 92–163.
16. **Телемтаев М. М., Попов А. А.** Применение целостного complete-подхода при создании информационных систем для управления недвижимостью в товариществах собственников жилья // Известия Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова. 2012. Т. 7, № 2. С. 16–35.
17. **Pavlova P., Richter A., Jansa J.** Analysis of theoretical and real values of heat consumption in units of the apartment building // Application of Experimental and Numerical Methods in Fluid Mechanics and Energy 2016: XX Anniversary of International Scientific Conference. 2016. Article number 020046. DOI: 10.1063/1.4953740
18. Residential load forecasting under a demand response program based on economic incentives / N. Ruiz [et al.] // International Transaction on Electrical Energy Systems. 2015. Vol. 25, no. 8. P. 1436–1451. DOI: 10.1002/etep.1905
19. **Souza R. C., Pessanha J. F. M., Oliveira F. L. C.** A residential consumer payment capability index based on fuzzy logic inference // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. 2013. Vol. 25, no. 3. P. 649–657. DOI: 10.3233/IFS-120672
20. **Ghavidelarf S., Shamseldin A. Y., Melville B. W.** A multi-scale analysis of low-rise apartment water demand through integration of water consumption, land use, and demographic data // Journal of the American Water Resources Association. 2016. Vol. 52, no. 5. P. 1056–1067. DOI: 10.1111/1752-1688.12430
21. **Панченко И.** PostgreSQL: вчера, сегодня, завтра // Открытые системы. СУБД. 2015. № 3. С. 34–37. URL: <https://www.osp.ru/os/2015/03/13046900>
22. **Муравьев С., Дворянkin С., Насенков И.** СУБД: проблема выбора // Открытые системы. СУБД. 2015. № 1. С. 22–24. URL: <http://www.osp.ru/os/2015/01/13045322>
23. **Селезнев К., Максимов В.** Импортозамещение: цель или средство? // Открытые системы. СУБД. 2015. № 1. С. 30–33. URL: <http://www.osp.ru/os/2015/01/13045325>
24. **Лашманов А.** Импортозамещение: риски и иллюзии // Открытые системы. СУБД. 2015. № 1. С. 34–35. URL: <http://www.osp.ru/os/2015/01/13045326>
25. **Казарова А. Я.** Оценка эффективности работы управляющих компаний // Политический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 113. С. 903–913. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-raboty-upravlyayuschih-kompaniy>
26. **Колдоба А. А.** Выбор критериев оценки эффективности деятельности управляющих компаний жилищно-коммунального хозяйства в регионе // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 19. С. 456–458. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-kriteriev-otsenki-effektivnosti-deyatelnosti-upravlyayuschih-kompaniy-zhilischno-kommunalnogo-hozyaystva-v-regione>



27. **Старцев Д. В.** Повышение эффективности деятельности управляющих компаний // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2014. Т. 2, № 1 (17). С. 108–111. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21711188>
28. **Ненастьева Е. В.** Особенности оценки эффективности деятельности управляющих компаний // Научная мысль. 2013. Т. 10, № 2-3. С. 36–39. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26149641>
29. **Ho D. C. W., Liusman E.** Measuring the performance of property management companies in high-rise flats // Facilities. 2016. Vol. 34, no. 3-4. P. 161–176. DOI: 10.1108/F-06-2014-0056
30. **Бурко В. А.** Социальный капитал как основное условие успешной деятельности Совета многоквартирного дома (Совета МКД) // Современный город: власть, управление, экономика. 2015. №. 1. С. 43–52. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24314122>

Поступила 28.07.2017; принята к публикации 03.10.2017; опубликована онлайн 20.03.2018

Об авторах:

Фирсова Светлана Анатольевна, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования, факультет математики и информационных технологий, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат физико-математических наук, ResearcherID: V-8052-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1831-684X>, karpushkinasa@yandex.ru

Тепасева Татьяна Евгеньевна, магистрант направления подготовки «Фундаментальная информатика и информационные технологии», факультет математики и информационных технологий, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ResearcherID: V-8305-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1492-7208>, tepaevatanya@yandex.ru

Вклад соавторов:

С. А. Фирсова: научное руководство, разработка архитектуры программной системы и определение функциональных требований к ней, подбор методических материалов и анализ литературных источников, подготовка исходных данных для проектируемой программной системы, верстка и редактирование текста; Т. Е. Тепасева: выбор программного обеспечения для создания прототипа программной системы и его реализация.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Rakhimova M. A. Inculcation of informational-calculative technologies as a basis for the development of housing and utilities system. *Vestnik Tadzhikskogo gosudarstvennogo universiteta prava, biznesa i politiki: Obshchestvennyye nauki* = Bulletin of the Tajik State University of Law, Business and Politics: Social Sciences. 2016; 66(1):136–144. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-informatsionno-raschetnyh-tehnologiy-osnova-razvitiya-sistemy-zhkh> (In Russ.)
2. Yakimenko I. A., Kozin I. Yu., Medvedev Ye. V. Application of information technology in housing and communal services. *Vestnik UGNTU. Nauka, obrazovaniye, ekonomika. Ser. "Ekonomika"* = UGNTU Bulletin. Science, Education, Economics. 2015; 11(1):171–174. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-informatsionnyh-tehnologiy-v-deyatelnost-predpriyatiy-zhkh> (In Russ.)
3. Kirsanov S. A., Istomin E. P., Mamedov Z. F. Application of information technology in housing and communal services. *Informatsionnyye tekhnologii i sistemy: upravleniye, ekonomika, transport, pravo* = Information Technologies and Systems: Management, Economics, Transport, Law. 2014; 3:99–109. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22600347> (In Russ.)
4. Alieva Zh. M. Foreign experience of state-private partnership in the field of the financial providing of objects of housing and communal services. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern Problems of Science and Education. 2015; 1-1:763–769. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25324234> (In Russ.)

5. Gracheva I. I. Foreign experience of the organization and regulation of housing and communal services. *Kontsept* = Concept. 2014; 20:4241–4245. Available at: <http://e-koncept.ru/2014/55113.htm> (In Russ.)
6. Gao W. Collective actions for the management of multi-owned residential building: a case of Hong Kong. *Habitat International*. 2015; 49:316–324. DOI: 10.1016/j.habitatint.2015.06.008
7. Ho D. C. W., Gao W. Collective action in apartment building management in Hong Kong. *Habitat International*. 2013; 38:10–17. DOI: 10.1016/j.habitatint.2012.09.001
8. Yau Y. Willingness to participate in collective action: the case of multiowned housing management. *Journal of Urban Affairs*. 2013; 35(2):153–171. DOI: 10.1111/j.1467-9906.2012.00621.x
9. Bodrov K. V. [The use of the state information system of housing and communal services in the Russian Federation]. *Gosudarstvennoye i munitsipalnoye upravleniye v XXI veke: teoriya, metodologiya, praktika* = State and Municipal Governance in the 21st century: theory, methodology, practice. 2016; 24:70–75. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26552808> (In Russ.)
10. Minaev V. A., Birger E. V. Network communication technology in housing and utilities sector. *Servis v Rossii i za rubezhom* = Service in Russia and Abroad. 2014; 51(4):130–139. DOI: 10.12737/4858 (In Russ.)
11. Martens A. A. The development of the system of payments for housing and utility services as a banking advancement trend. *Finansovaya analitika: problemy i resheniya* = Service in Russia and Abroad. 2016; 296(14):49–62. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/razvitie-sistemy-raschetov-za-zhilischno-kommunalnye-uslugi-kak-trend-prodvizheniya-bankovskogo-biznesa> (In Russ.)
12. Makarova I. V., Maksimov A. D. Billing of housing and communal services: problems and solutions. *Rossiyskoye predprinimatelstvo* = Russian Entrepreneurship. 2012; 9:109–112. Available at: <https://creativeconomy.ru/lib/7482> (In Russ.)
13. Demidov A. V., Shateev R. V., Potlova T. A., Nikonorova G. I., Pashmentova A. S., Shiryayev V. A. The issue of modern level of automation in the housing and communal services. *Uspekhi sovremennoy nauki i obrazovaniya* = Advances in Modern Science and Education. 2016; 4(9):187–190. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26719818> (In Russ.)
14. Eris E. E., Sibira A. I. The functionality of information systems total management. *Postulat* = Postulate. 2017; 15(1):6–11. Available at: <http://e-postulat.ru/index.php/Postulat/article/view/329/347> (In Russ.)
15. Telemtaev M. M., Popov A. A. [The analysis of information systems used abroad by real estate management organizations and owners (tenants) of housing]. *Izvestiya Rossiyskogo ekonomicheskogo universiteta im. G. V. Plekhanova* = Plekhanov Russian Economic University Bulletin. 2012; 6(1):92–163. (In Russ.)
16. Telemtaev M. M., Popov A. A. Application of a holistic complete approach in the creation of information systems for real estate management in homeowners' associations. *Izvestiya Rossiyskogo ekonomicheskogo universiteta im. G. V. Plekhanova* = Plekhanov Russian Economic University Bulletin. 2012; 7(2):16–35. (In Russ.)
17. Pavlova P., Richter A., Jansa J. Analysis of theoretical and real values of heat consumption in units of the apartment building. In: Application of Experimental and Numerical Methods in Fluid Mechanics and Energy 2016: XX Anniversary of International Scientific Conference. 2016. Article no. 020046. DOI: 10.1063/1.4953740
18. Ruiz N., Claessens B., Jimeno J., López J. A., Six D. Residential load forecasting under a demand response program based on economic incentives. *International Transaction on Electrical Energy Systems*. 2015; 25(8):1436–1451. DOI: 10.1002/etep.1905
19. Souza R. C., Pessanha J. F. M., Oliveira F. L. C. A residential consumer payment capability index based on fuzzy logic inference. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 2013; 25(3):649–657. DOI: 10.3233/IFS-120672
20. Ghavidelfar S., Shamseldin A. Y., Melville B. W. A multi-scale analysis of low-rise apartment water demand through integration of water consumption, land use, and demographic data. *Journal of the American Water Resources Association*. 2016; 52(5):1056–1067. DOI: 10.1111/1752-1688.12430
21. Panchenko I. [PostgreSQL: yesterday, today, tomorrow]. *Otkrytyye sistemy. SUBD* = Open Systems. DBMS. 2015; 3:34–37. URL: <https://www.osp.ru/os/2015/03/13046900> (In Russ.)
22. Muraev S., Dvoryankin S., Nasenkov I. [DBMS: the problem of choice]. *Otkrytyye sistemy. SUBD* = Open Systems. DBMS. 2015; 1:22–24. Available at: <http://www.osp.ru/os/2015/01/13045322> (In Russ.)



23. Seleznev K., Maksimov V. [Import substitution: a goal or a means?] *Otkrytyye sistemy. SUBD* = Open Systems. DBMS. 2015; 1:30–33. Available at: <http://www.osp.ru/os/2015/01/13045325> (In Russ.)
24. Lashmanov A. [Import substitution: risks and illusions]. *Otkrytyye sistemy. SUBD* = Open Systems. DBMS. 2015; 1:34–35. Available at: <http://www.osp.ru/os/2015/01/13045326> (In Russ.)
25. Kazarova A. Ya. Assessment of overall performance of managing companies. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Polytechnical Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University 2015; 113:903–913. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-raboty-upravlyayuschiy-kompaniy> (In Russ.)
26. Koldoba A. A. [Selection of criteria for assessing the performance of management companies of housing and communal services in the region]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* = Kazan Technological University Bulletin. 2014; 17(19):456–458. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-kriteriev-otsenki-effektivnosti-deyatelnosti-upravlyayuschiy-kompaniy-zhilishchno-kommunalnogo-hozyaystva-v-regione> (In Russ.)
27. Startsev D. V. Improving the efficiency and performance of property management companies. *Uchenyye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Komsomolsk-on-Amur State Technical University Bulletin. 2014; 2,1(17):108–111. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21711188> (In Russ.)
28. Nenasteyeva Ye. V. [Features of performance evaluation of management companies]. *Nauchnaya mysl* = Scientific Thought. 2013; 10(2-3):36–39. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26149641> (In Russ.)
29. Ho D. C. W., Liusman E. Measuring the performance of property management companies in high-rise flats. *Facilities*. 2016; 34(3-4):161–176. DOI: 10.1108/F-06-2014-0056
30. Burko V. A. Social capital as a basic condition for the success work of the manyflats building council. *Sovremennyy gorod: vlast, upravleniye, ekonomika* = Modern City: Power, Management, Economics. 2015; 1:43–52. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24314122> (In Russ.)

Submitted 28.07.2017; revised 03.10.2017; published online 20.03.2018

About the authors:

Svetlana A. Firsova, Associate Professor, Chair of Computer Aided Design Systems, Faculty of Mathematics and Information Technologies, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Physics and Mathematics), ResearcherID: V-8052-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1831-684X>, karpushkinasa@yandex.ru

Tatyana E. Tepaeva, Master's Degree Student in Fundamental Informatics and Information Technologies, Faculty of Mathematics and Information Technologies, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), ResearcherID: V-8305-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1492-7208>, tepaevatanya@yandex.ru

Contribution of the co-authors:

S. A. Firsova: scientific management, development of the architecture of the software system and definition of functional requirements for it, selection of methodological materials and analysis of literature sources, preparation of initial data for the projected software system, layout and editing of the text; T. E. Tepaeva: choice of software for creating a prototype of the software system and its implementation.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.



Моделирование и прогнозирование показателей эффективности образовательной деятельности высшего учебного заведения

Н. В. Яндыбаева

*Балаковский филиал ФГБОУ ВО «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации»
(г. Балаково, Россия)*

nat07@inbox.ru

Введение. Для контроля эффективности образовательной деятельности вузов проводится ежегодный мониторинг. Министерством образования и науки Российской Федерации были установлены порядок проведения данного мониторинга и 8 пороговых значений показателей эффективности. Если более 4 показателей окажутся ниже данных значений, вуз лишается права на осуществление образовательной деятельности или реформируется. В настоящее время отсутствует специализированное программное обеспечение для осуществления оперативного управления показателями эффективности. Целью исследования является разработка математических моделей, методов и программ для моделирования и прогнозирования показателей эффективности образовательной деятельности вуза.

Материалы и методы. Разработан комплекс математических моделей, состоящий из модели системной динамики и регрессионной модели. В качестве моделируемых переменных использовались базовые показатели эффективности: образовательная деятельность вуза, научно-исследовательская деятельность, международная деятельность, финансово-экономическая деятельность, заработная плата профессорско-преподавательского состава, трудоустройство выпускников, контингент студентов, дополнительные показатели образовательных организаций. Выполнена проверка адекватности разработанных математических моделей с помощью фактических значений показателей эффективности. Приведено описание численного метода решения системы дифференциальных уравнений с помощью «ручного» интегрирования с применением рекуррентной трехшаговой процедуры с интуитивным выбором шага. Данный метод основан на методе Рунге-Кутты 4-го порядка точности.

Результаты исследования. Показан пример расчета прогнозных значений показателей эффективности Балаковского филиала ФГБОУ ВО «РАНХиГС» на временном интервале $[0; 3]$ года с использованием разработанного математического обеспечения. Описана процедура вычисления квадратичного критерия, применяемого для оперативного управления показателями эффективности. Величина данного критерия определяется с помощью метода Симпсона и искусственной рекуррентной нейронной сети Элмана, что позволяет повысить точность вычислений. Приведена структурная схема взаимодействия пользователей с программным модулем в процессе мониторинга.

Обсуждение и заключения. Разработанное математическое и программное обеспечение может использоваться для прогнозирования показателей эффективности образовательной деятельности вуза при осуществлении мониторинга, что существенно снижает вероятность возникновения критических ситуаций. Оперативное управление показателями эффективности проводится с помощью варьирования значений квадратичного критерия.



Ключевые слова: системная динамика, математическая модель, мониторинг деятельности вуза, дифференциальное уравнение, программный модуль

Для цитирования: Яндыбаева Н. В. Моделирование и прогнозирование показателей эффективности образовательной деятельности высшего учебного заведения // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 1. С. 120–136. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.120-136

Modeling and Forecasting Performance Indicators for Educational Activities of Higher Educational Institution

N. V. Yandybayeva

*Balakovo Branch of the Russian Presidential Academy
of National Economy and Public Administration
(Balakovo, Russia)*

**nat07@inbox.ru*

Introduction. In Russia, the effectiveness of educational activities of higher educational institutions is monitored on an annual basis. The Ministry of Education and Science of the Russian Federation established the monitoring procedure and eight threshold levels for performance indicators. A university may be revoked or reformed if at least four important indicators are below threshold levels. There is no special software for operational management of performance indicators. The aim of the research is to develop mathematical models, methods and programs for modeling and forecasting performance indicators.

Materials and Methods. The developed complex of mathematical models consists of a model of system dynamics and a regression model. As the simulated variables, the basic performance indicators of the educational activities of the university are used: educational activities, research activities, international activities, financial and economic activities, the salaries of teaching staff, employment of graduates, a contingent of students, additional indicators of educational organizations. The adequacy of the developed mathematical models was checked with the help of actual values of performance indicators. The description of the numerical method for solving a system of differential equations through “manual” integration via use of a recurrent three-step procedure with an intuitive step selection is presented. The method is based on the Runge-Kutta method of the fourth order of accuracy.

Results. An example of calculating the predicted values of the performance indicators of the Balakovo Branch of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration on the time interval in [0;3] years using the developed software is presented. The procedure for calculating the quadratic criterion used for operational management of performance indicators is described. The magnitude of the quadratic criterion is determined through using the Simpson method and the artificial Elman recurrent neural network to improve the accuracy of the computations. The structural scheme of interaction of users with the program module during monitoring is provided.

Discussion and Conclusions. The developed mathematical software can be used to predict the performance indicators of the educational activities of the university in monitoring. This method reduces significantly the probability of emergence of critical situations. The operational management of performance indicators is carried out by varying the values of the quadratic criterion.

Keywords: system dynamics, mathematical model, monitoring of university activities, differential equation, software module

For citation: Yandybaeva N. V. Modeling and Forecasting Performance Indicators for Educational Activities of Higher Educational Institution. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(1):120–136. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.120-136

Введение

Одним из показателей национальной безопасности Российской Федерации является уровень обеспеченности ресурсами образования и науки (в процентах от ВВП) [1]. Несомненным является тот факт, что чем больше внимания государство уделяет развитию науки и образования, тем более эффективно работает экономика, растут темпы научно-технического прогресса и, как следствие, увеличивается благосостояние граждан.

Решение проблемы повышения качества образования в вузах России способствует повышению престижа российского высшего образования и его успешной интеграции в международное научно-образовательное пространство. Для оценки качества высшего образования в России используется определение эффективности образовательной деятельности вуза посредством мониторинга. Основная цель мониторинга – формирование информационно-аналитических материалов об образовательных организациях высшего образования с целью контроля их образовательной деятельности.

Мониторинг проводится в несколько этапов.

1. Определение ключевых направлений деятельности образовательных организаций.

2. Выработка показателей их оценки.

3. Сбор и верификация первичных данных статистики.

4. Анализ данных и подготовка предложений:

- расчет показателей эффективности деятельности образовательных организаций и их филиалов;

- определение пороговых значений на основе медианных значений показателей в рамках референтных групп.

5. Публикация результатов мониторинга.

6. Использование результатов мониторинга для принятия решений учредителями и при планировании контрольных мероприятий в области образования Федеральной службой по надзору в сфере образования и науки¹.

Показатели эффективности вуза рассчитываются на основании «Методики расчета показателей мониторинга эффективности образовательных организаций высшего образования 2017 года»², в которой определены пороговые значения показателей эффективности деятельности образовательных организаций высшего образования (табл. 1).

Вузы относятся к имеющим признаки неэффективности в том случае, если образовательная организация или ее филиал достигает порогового значения любых 4 из 8 показателей (согласно Приказу Министерства образования и науки РФ от 13.03.2017 г. № 222 «О проведении мониторинга эффективности образовательных организаций высшего образования»).

В 2017 г. Межведомственная комиссия под председательством главы Минобрнауки проанализировала деятельность 769 вузов и 692 филиалов и признала неэффективными 107 вузов и филиалов.

¹ Сайт главного информационно-вычислительного центра Министерства образования и науки Российской Федерации. URL: <http://indicators.miccedu.ru/monitoring/?m=vpo>

² Методика расчета показателей мониторинга эффективности образовательных организаций высшего образования 2017 года. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71535890>



Пороговые значения показателей эффективности высших учебных заведений

Threshold values of performance indicators of higher education institutions

$\tilde{O}_i$	Показатель эффективности / Performance indicator	Пороговое значение / Threshold value
X_1	<i>E.1.1. Образовательная деятельность.</i> Средний балл студентов, принятых по результатам ЕГЭ на обучение по программам очной подготовки бакалавриата и специалитета за счет средств соответствующих бюджетов бюджетной системы РФ и с оплатой стоимости затрат на обучение физическими и юридическими лицами, баллы / <i>Educational activity.</i> The average score of students accepted by the results of the Unified State Examination for full-time education according to the Bachelor's and Specialization programs at the expense of the corresponding budgets of the budget system of the Russian Federation and with the payment of the cost of training costs by individuals and legal entities, points	60,00
X_2	<i>E.2.1. Научно-исследовательская деятельность.</i> Объем НИОКР в расчете на одного научно-педагогического работника (НПР), тыс. руб. / <i>Scientific and research activity.</i> The volume of research and development per one scientific and pedagogical worker (SPW), thousand rubles	51,28
X_3	<i>E.3.1. Международная деятельность (показатель для вузов).</i> Удельный вес численности иностранных студентов, обучающихся по программам бакалавриата, специалитета, магистратуры, в общей численности студентов (приведенный контингент) / <i>International activity (indicator for universities).</i> Specific weight of the number of foreign students studying under the Bachelor's, Specialized, Master's programs, in the total number of students (estimated contingent)	1,00
X_4	<i>E.4.1. Финансово-экономическая деятельность.</i> Доходы образовательной организации из всех источников в расчете на одного НПР, тыс. руб. / <i>Financial and economic activity.</i> Revenues of the educational organization from all sources per SPW, thousand rubles	1 327,57
X_5	<i>E.5.1. Зарботная плата профессорско-преподавательского состава.</i> Отношение заработной платы профессорско-преподавательского состава к средней заработной плате по экономике региона, % / <i>Salaries of university teachers.</i> The ratio of the salaries of the university teachers to the average wage for the economy of the region, %	150,00
X_6	<i>E.6.1. Трудоустройство.</i> Удельный вес выпускников, трудоустроившихся в течение календарного года, следующего за годом выпуска, в общей численности выпускников образовательной организации, обучавшихся по основным образовательным программам высшего образования, % / <i>Employment.</i> Share of graduates who have found employment in the calendar year following the year of release, in the total number of graduates of the educational organization trained in the main educational programs of higher education, %	75,00
X_7	<i>E.7.1. Контингент студентов.</i> Приведенный контингент студентов, ед. / <i>Contingent of students.</i> Estimated contingent of students, units	220,00
X_8	<i>E.8.7. Дополнительные показатели образовательных организаций.</i> Численность сотрудников, из числа ППС (приведенных к доле ставки), имеющих ученые степени кандидата или доктора наук, в расчете на 100 студентов, ед. / <i>Additional indicators of educational organizations.</i> The number of employees, from the number of teachers (reduced to the share of the rate), having a scientific degree of a candidate or doctor of science, per 100 students	2,78

В связи с этим возникает необходимость разработки математических моделей, алгоритмов и программ, позволяющих в рамках информационной

системы вуза осуществить имитационное моделирование и прогнозирование основных показателей эффективности деятельности вуза, а также разработка

методики оперативного управления показателями эффективности.

Обзор литературы

Особенности образовательного процесса в высшей школе были проанализированы в трудах К. Арджириса, С. Богомолова, А. Аганбегяна, В. Байденко³, О. Виханского, А. Джурина, Э. Деминга⁴ и др. Учеными исследовались вопросы контроля и управления качеством с учетом основных принципов теории управления и с использованием опыта внедрения передовых методик обучения. В настоящее время в России для получения лицензии на образовательную деятельность вуз должен пройти лицензирование и аккредитацию. Особенности проведения данных процедур описаны в нормативно-правовых документах и трудах исследователей В. Г. Наводнова, Г. Н. Мотовой [2] и др. Однако при проведении процедур лицензирования и аккредитации возникают определенные проблемы, основными среди которых являются периодичность экспертизы и отсутствие учета воздействия различных факторов на качество образовательного процесса на пятилетнем интервале. Вследствие этого показатели аккредитации, рассчитанные на основе одномоментного замера, не предоставляют администрации объективной и точной информации о текущей ситуации в вузе⁵.

Для описания образовательного процесса также используется большое коли-

чество показателей, изменение которых требует длительного времени. Подобные проблемы характерны также для процедуры мониторинга эффективности.

Вопросами разработки и использования математических моделей для контроля качества учебного процесса занимались такие ученые как О. А. Граничина⁶, В. П. Сухинин [3], М. В. Горшенина [4], В. И. Мешалкин⁷. Исследованию проблем разработки математических моделей, алгоритмов и программ посвящены также некоторые работы автора данной статьи [5–6].

Существующий методологический аппарат не предоставляет возможности прогнозирования показателей аккредитации и мониторинга, что, в свою очередь, не позволяет администрации своевременно устранить возникающие негативные тенденции и снижает достоверность проводимой экспертизы. Отсутствие эффективных математических моделей и методов, позволяющих осуществлять аналитическое моделирование и прогнозирование показателей эффективности образовательной деятельности вуза, обусловило актуальность проведенного исследования.

Особенности разработки автоматизированных информационных систем, в т. ч. для образовательных организаций, были проанализированы в трудах как российских (А. М. Бершадского⁸, А. С. Клещева⁹, Д. А. Новикова [7], О. И. Ларичева [8]), так

³ Байденко В. И. Болонский процесс: середина пути. М. : Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов. Российский Новый Университет, 2005. 370 с. URL: http://window.edu.ru/resource/938/66938/files/04_349.pdf

⁴ Edwards D. W. The new economics for industry, government, education. MIT Press, 2000. 247 p. URL: <https://bookree.org/reader?file=1442225>

⁵ Официальный сайт ФГБУ «Росаккредитация». URL: <http://nica.ru>

⁶ Граничина О. А. Контроль качества образовательного процесса в вузах России и за рубежом. СПб. : Изд-во СПбГУ, 2006. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19130857>

⁷ Мешалкин В. И. Учреждения высшего и среднего профессионального образования в Российской Федерации: аккредитация – самообследование – рейтинг. М. : Изд-во РУДН, 1995. 136 с.

⁸ Бершадский А. М., Бурукина И. П. Информационная система кафедрального документооборота // Телематика : тр. XVI Всерос. науч.-метод. конф. СПб., 2009. Т. 1. С. 149–150.

⁹ Клещев А. С., Черняховская М. Ю. Современное состояние компьютерной обработки знаний // Сб. науч. тр. Владивосток, 2001. С. 273–284.



и зарубежных ученых (I. F. Codd [9], T. R. Gruber¹⁰, G. Piatetsky-Shapiro [10], U. Wang¹¹ и др.).

В российских вузах для оценки эффективности их деятельности используются следующие программные решения. Автоматизированная информационная система «Наука» функционирует в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет». Она предназначена для анализа результатов и управления научно-исследовательской деятельностью профессорско-преподавательского состава университета.

Кроме этого, для автоматизации процессов в вузах используется «Галактика Управление Вузом»¹² – современная информационная система, основными функциями которой являются: осуществление эффективного планирования учебного процесса; объединение основных подразделений в единую информационную систему вуза; снижение трудоемкости процессов обработки данных; обеспечение контроля и управления финансовыми и кадровыми ресурсами и пр. Отметим также информационную систему «Университет», автоматизирующую процессы управления деятельностью высшего учебного заведения и успешно функционирующую в ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный университет».

Общими недостатками вышеперечисленных информационных систем являются сложная архитектура, а также слабоструктурированная система экспорта и импорта данных. Ни одна из них не предназначена для вычисления прогнозных значений показателей эффективности образовательной деятельности вуза.

Задачей исследования является разработка математических методов, моделей и программ для моделирования и прогнозирования показателей эффективности деятельности вуза, а также методики оперативного управления показателями эффективности.

Материалы и методы

В разработанный комплекс математических моделей для проведения компьютерных экспериментов по прогнозированию основных показателей эффективности деятельности вуза входят модель системной динамики и регрессионная модель.

В основу метода системной динамики положены следующие допущения:

- динамике поведения сложного процесса можно отслеживать с помощью изменения значений «уровней», а сами изменения регулировать «потоками», которые повышают или снижают эти уровни;

- все изменения в функционировании системы основаны на «петлях обратных связей», которые являются замкнутыми цепями взаимодействий. Подобная цепь соединяет причину действия с его результатом, изменяющим состояние окружающей среды;

- петли обратной связи в системе соединяются нелинейно, поэтому информация об уровнях системы влияет через обратные связи на сами уровни непропорционально и труднопредсказуемо¹³.

Выберем в качестве моделируемых переменных в разработанной математической модели показатели эффективности деятельности вуза X_1 – X_8 , приведенные в табл. 1.

На рис. 1 приведен граф причинно-следственных связей между моделируемыми переменными X_1 – X_8 . Стрелками

¹⁰ Gruber T. R., Tenenbaum J. M., Weber J. C. Toward acknowledge medium for collaborative product development // Artificial Intelligence in Design. Boston : Kluwer Academic Publishers, 1992. URL: <http://tomgruber.org/writing/onto-design.pdf>

¹¹ Survey on QoS Management of VoIP / X. Chen [et al.] // Proc. Int. Conf. on Computer Networks and Mobile Computing, 2003.

¹² Официальный сайт корпорации «Галактика». URL: <https://www.galaktika.ru/vuz>

¹³ Forrester J. W. World dynamics. Cambridge ; Massachusetts : Wright-Alien Press, Inc. 1971. DOI: 10.1017/S0770451800029973

показаны причинно-следственные связи между переменными, кружками обозначены функциональные зависимости $f_1(X_7), \dots, f_9(X_7)$, определяющие степень влияния одной моделируемой переменной на другую. Причинно-следственные связи для разработанной модели были выбраны путем изучения мнений экспертов, подтвержденных экспериментально при проведении мониторинга в Балаковском филиале ФГБОУ ВО «РАНХиГС».

Проанализируем производные моделируемых переменных X_1-X_8 как функции данных переменных. Производные уровней по времени $\frac{dX_i(t)}{dt}$, $i=1..n$, которые называются потоками, являются скоростями изменения уровней в единицу времени. В этом случае связи между потоками и моделируемыми переменными будут иметь вид систем дифференциальных уравнений:

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = F_i(X_1(t), \dots, X_n(t)), i=1..n. \quad (1)$$

Для подхода Дж. Форрестера в системной динамике характерны упрощение и декомпозиция системы.

Представим функции F_i в виде разложений в ряд по степеням $X_k(t)$, и проанализируем первые, линейные, члены разложения. Коэффициенты при членах разложения определяются экспериментально. Система в этом случае имеет вид:

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = \alpha_{i,0} + \alpha_{i,1}X_1(t) + \dots + \alpha_{i,n}X_n(t), i=1..n, \quad (2)$$

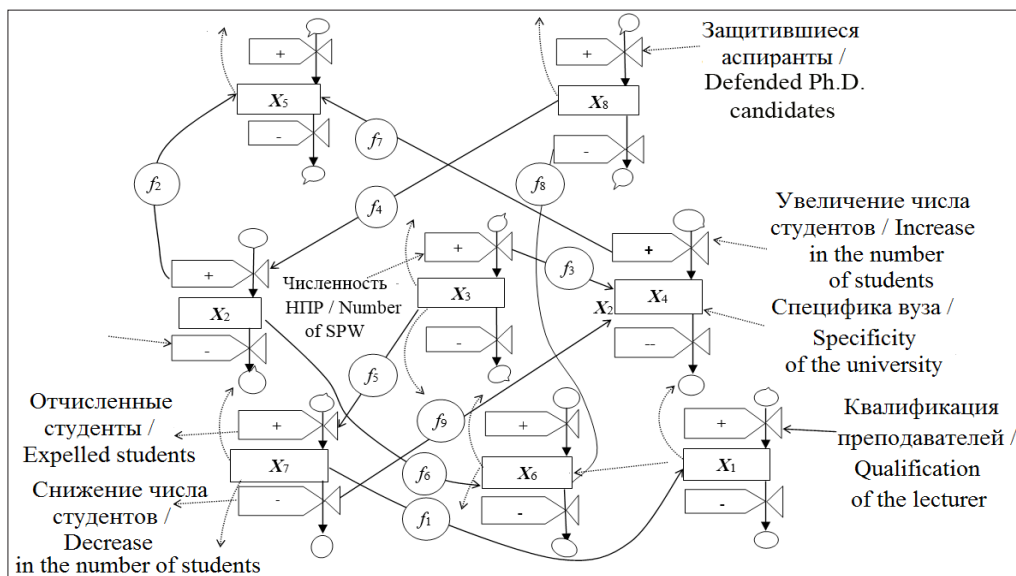
где произведения $\alpha_{i,k}X_k(t)$, $i=1..n$ – темпы i -го потока; t – время.

Поскольку сложная система нелинейна, пусть темпы зависят от уровней: $\alpha_{i,k} = \alpha_{i,k}(X_1(t), \dots, X_n(t))$, $k=1..n$. Указанная зависимость имеет мультипликативный вид:

$$\alpha_{i,k}(x_1(t), \dots, x_n(t)) = \alpha_{i,k} f_{i,k,1}(x_1(t)) \dots f_{i,k,n}(x_n(t)), \quad k=1..n, \quad (3)$$

где $\alpha_{i,k}$ – константы из уравнения (2).

Каждый из элементов $f_{i,k,l}$, $l=1..n$ мультипликативной модели зависит только от уровня $X_l(t)$. За «базовое»



Р и с. 1. Граф причинно-следственных связей между переменными X_1-X_8

F i g. 1. The graph of cause-effect relations between the variables X_1-X_8



значение $f_{i,k,l}$, от которого под влиянием аргументов они могут отклоняться в ту или иную сторону, принимается 1.

Таким образом, модель имеет вид:

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = \alpha_{i,0} + \sum_{k=1}^n \alpha_{i,k} \prod_{l=1}^n f_{i,k,l}(X_l(t)), X_k(t), i = 1...n. \quad (4)$$

Система уравнений (4) дает декомпозицию исходной системы общего вида (1)¹⁴.

Проанализируем моделируемую переменную X_2 – объем НИОКР в расчете на одного научно-педагогического работника (НПР). Подграф для моделируемой переменной приведен на рис. 2.

Запишем для X_2 дифференциальное уравнение следующего вида:

$$\frac{dX_2(t)}{dt} = \frac{(F(t) \cdot PN(t) \cdot f_4(X_8) - (G(t) \cdot PK(t)))}{PS(t)}, \quad (5)$$

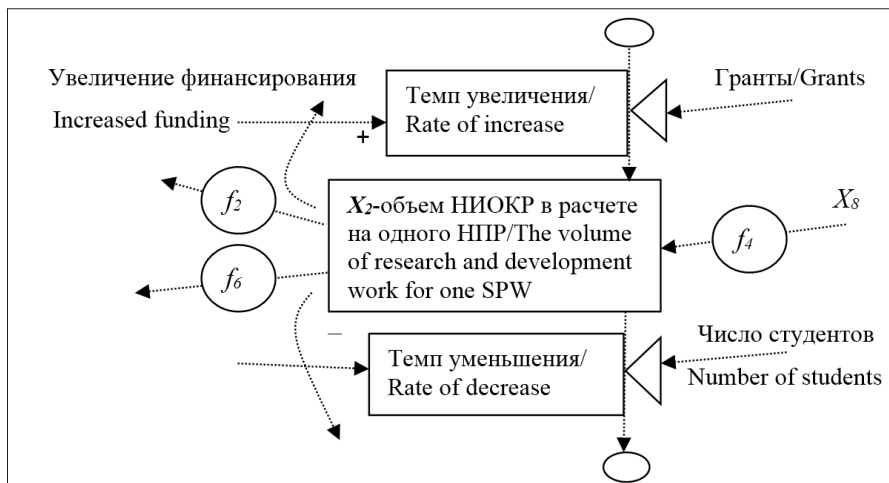
где $X_2(t)$ – текущий объем НИОКР в расчете на одного НПР, руб.; $F(t)$ и $G(t)$ – объем НИОКР в расчете на одного НПР на начало и конец расчетного периода соответственно, руб.; $PN(t)$ и $PK(t)$ – численность НПР на начало и конец расчетного периода, чел.; $PS(t)$ – среднегодовая численность НПР, чел.

Аналогично записываются уравнения для переменных X_1, X_3-X_8 .

Таким образом, разработанная на основе системно-динамического подхода математическая модель имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dX_1(t)}{dt} = \frac{EN(t) - EK(t) \cdot f_1(X_7)}{ES(t)}; \\ \frac{dX_2(t)}{dt} = \frac{F(t) \cdot PN(t) \cdot f_4(X_8) - G(t) \cdot PK(t)}{PS(t)}; \\ \frac{dX_3(t)}{dt} = M(t) + Kv(t) - S_o(t); \\ \frac{dX_4(t)}{dt} = \frac{(SK(t) + Mo(t) + Vr(t) + PN(t))f_9(X_7) \cdot f_5(X_2) - X_2(t) + MTO(t) + NR(t)}{PS(t)}; \\ \frac{dX_5(t)}{dt} = (US(t) + St(t) + Gr(t)) \cdot f_2(X_2) \cdot f_7(X_4) - (T(t) + I(t)); \\ \frac{dX_6(t)}{dt} = SV(t) \cdot f_6(X_2) \cdot f_8(X_8) - (U(t) + SnV(t)); \\ \frac{dX_7(t)}{dt} = B_o(t) + B_z(t) \cdot f_5(X_3) - D(t); \\ \frac{dX_8(t)}{dt} = \frac{EK(t) + KP(t) - (BK(t) + KP(t))}{KS(t)}, \end{cases} \quad (6)$$

где $X_1(t)-X_8(t)$ – текущие значения моделируемых переменных; $EN(t)$ и $EK(t)$ – средний балл ЕГЭ на начало и конец расчетного периода; $ES(t)$ – среднегодовое значение среднего балла ЕГЭ; $K_v(t)$ –



Р и с. 2. Подграф моделируемой переменной X_2

F i g. 2. The subgraph of the simulated variable X_2

¹⁴ Бродский Ю. И. Лекции по математическому и имитационному моделированию. М. ; Берлин : Директ-Медиа, 2015. 240 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25689955>

ежегодная государственная квота на обучение за рубежом, шт.; $S_o(t)$ – стоимость обучения в вузе (руб.); $US(t)$ – наличие ученой степени у ППС вуза; $St(t)$ – размер ставки ППС в данном учебном году, руб.; $G(t)$ – гранты научных фондов, руб.; $T(t)$ – налоги, руб.; $I(t)$ – уровень инфляции, %; $SK(t)$ – средства частных компаний, руб.; $Mo(t)$ – средства Минобрнауки, руб.; $Vr(t)$ – текущий объем финансирования за расчетный период, руб.; $MTO(t)$ – материально-техническая оснащенность учебного процесса, руб.; $NR(t)$ – накладные расходы вуза, руб.; $SV(t)$ – спрос на бакалавров/специалистов, чел.; $SnV(t)$ – количество выпускников по данному направлению/специальности, чел.; $B_o(t)$ – количество студентов очной формы обучения, чел.; $B_z(t)$ – количество студентов заочной формы обучения, чел.; $D(t)$ – количество отчисленных студентов на конец учебного года, чел.; $BK(t)$ и $EK(t)$ – количество кандидатов наук на начало и конец расчетного периода соответственно, чел.; $KP(t)$ – количество докторов наук, профессоров, чел.; $KS(t)$ – общая численность ППС, чел.

В разработанной математической модели используются следующие функциональные зависимости: $f_1(X_7)$ – среднего балла студентов от приведенного контингента студентов; $f_2(X_2)$ – заработной платы ППС от объема НИОКР в расчете на одного НПП; $f_3(X_2)$ – доходов вуза от объема НИОКР на одного НПП; $f_4(X_8)$ – объема НИОКР на одного НПП от численности кандидатов/докторов наук; $f_5(X_3)$ – приведенного контингента студентов от численности иностранных студентов; $f_6(X_2)$ – удельного веса трудоустроившихся выпускников от объема НИОКР на одного НПП; $f_7(X_4)$ – отношения заработной платы ППС от доходов вуза из всех источников на одного НПП; $f_8(X_8)$ – удельного веса трудоустроившихся выпускников от численности кандидатов/докторов наук; $f_9(X_7)$ – приведенного

контингента студентов от доходов вуза из всех источников на одного НПП.

Функциональные зависимости $f_i(X_i)$ $i = 1...9$, определяются экспериментально и могут быть аппроксимированы полиномами 3–4 степени. Например, функциональные зависимости $f_2(X_2)$ и $f_3(X_2)$ имеют следующий вид:

$$f_2(X_2) = 1,2 \cdot X_2^4 - 2,6 \cdot X_2^3 + 1,7 \cdot X_2^2 + 0,63 \cdot X_2 + 0,1;$$

$$f_3(X_2) = -0,52 \cdot X_2^4 + 0,97 \cdot X_2^3 - 0,75 \cdot X_2^2 + 1,2 \cdot X_2 + 0,14.$$

С целью проверки адекватности математической модели (6) было произведено сравнение расчетных показателей X_1-X_8 с показателями, полученными по регрессионной модели, а также с ретроспективными данными.

Регрессионная модель была получена с использованием статистических данных (показателей эффективности) в филиале академии на временном интервале 2013–2017 гг. Параметры уравнений регрессии определялись с помощью метода наименьших квадратов. При определении вида регрессионной модели проводился анализ на наличие гетероскедастичности.

$$X_1^n = -0,7967t^4 + 10,035t^3 - 44,028t^2 + 77,11t + 9,95;$$

$$X_2^n = 38,288 \cdot \ln|t| - 0,253;$$

$$X_3^n = -0,2075t^2 + 1,2845t - 0,6575;$$

$$X_4^n = 256,1 \cdot \ln|t| + 1036,7;$$

$$X_5^n = -11,569t^3 + 102,49t^2 - 24587t + 282,18;$$

$$X_6^n = 5,6501 \cdot \ln|t| + 65,292;$$

$$X_7^n = -9,9417t^3 + 89,925t^2 - 267,73t + 683,14;$$

$$X_8^n = 0,3283t^3 - 2,77t^2 + 6,9817t - 1,58. \quad (7)$$



Проверим адекватность разработанного комплекса моделей. Рассчитаем по модели системной динамики значение переменной X_2 в 2016 г. по формуле (5):

$$X_2(2016) = \frac{46,97 \cdot 66 \cdot 2,1 - 48,44 \cdot 64}{65} = 52,46 \text{ тыс. руб.}$$

Согласно регрессионной модели, $X_2(2016) = 61$ тыс. руб. Фактическое значение переменной X_2 в 2016 г. составило 54,43 тыс. руб. Таким образом, абсолютная погрешность вычислений по моделям (6–7) в сравнении с ретроспективными данными варьируется от 4 % до 12 %, что свидетельствует об относительной адекватности комплекса моделей.

Поскольку задача прогнозирования показателей эффективности деятельности вуза является задачей Коши с заданными начальными условиями, то теоретически она может решаться с использованием традиционных численных методов: Эйлера, Рунге-Кутты и др. Однако разработанная математическая модель (6) является сложной, нелинейной, неоднородной, разнотемповой, нестационарной системой дифференциальных уравнений, поэтому использование классического метода Рунге-Кутты 4-го порядка для ее решения вызывает определенные затруднения.

Решить систему (6) можно с помощью «ручного» интегрирования посредством рекуррентной трехшаговой процедуры с интуитивным выбором шага:

1) вычисление временных определенных интегралов от временных функциональных зависимостей;

2) ручной выбор шага для нелинейных функциональных зависимостей по схеме Рунге-Кутты 4-го порядка;

3) подстановка на следующем шаге результатов интегрирования на предыдущем шаге с вычислением временных функциональных зависимостей на текущем шаге.

Результаты исследования

При проведении модельного эксперимента с разработанным математическим обеспечением были рассчитаны показатели эффективности деятельности Балаковского филиала ФГБОУ ВО «РАНХиГС». В качестве начальных значений были выбраны нормированные относительно пороговых показатели эффективности образовательной деятельности вуза за 2017 г.:

$$X_{oi} = [0,85; 1,27; 1,19; 1,02; 1,13; 0,93; 1,58; 1,09].$$

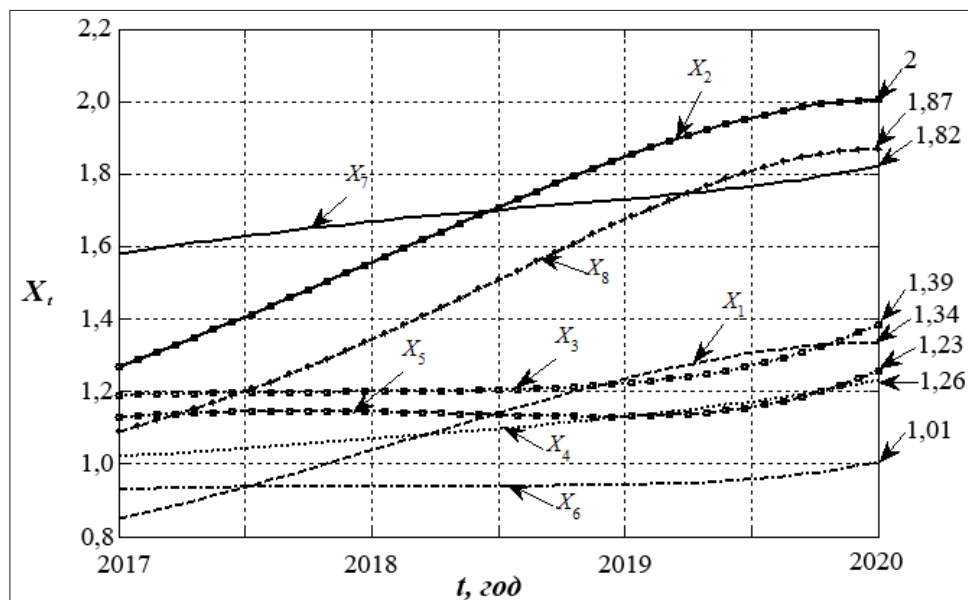
На рис. 3 показаны расчетные показатели по Балаковскому филиалу «РАНХиГС» на интервале [0; 3] года.

При проведении мониторинга эффективности вуза возникает необходимость обработки больших объемов статистических данных, что существенно повышает трудоемкость выполняемых работ. Поэтому для автоматизации вычислений прогнозных значений показателей эффективности требуется разработка специализированного программного обеспечения¹⁵ [11–13].

В интегрированной среде разработки ПО Visual Studio на языке программирования C# был создан «Модуль для определения эффективности деятельности высшего учебного заведения»¹⁶. Важным достоинством программы является определение текущей ситуации в вузе и предоставление лицу, принимающему решения, возможности оперативного управления показателями эффективности. Рассмотрим алгоритм работы программы «Модуль для определения эффективности деятельности высшего учебного заведения» [14].

¹⁵ Яндыбаева Н. В., Кушников В. А. Inform System CQEP // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616991 от 08.09.2011 г.

¹⁶ Яндыбаева Н. В., Кожанова Е. Р., Кушников В. А. Модуль для определения эффективности деятельности вуза // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014613210 от 19.03.2014 г.



Р и с. 3. Динамика моделируемых переменных X_1 – X_8 на интервале $[0; 3]$ года

F i g. 3. Dynamics of the simulated variables X_1 – X_8 on the interval $[0; 3]$ years

На первом этапе осуществляется выбор местоположения и типа вуза. Значения пороговых показателей мониторинга для различных типов вузов приведены в соответствующих базах данных, созданных в MS Access 2007. Подключения баз к основному блоку программы производится через .NET Framework для OLE DB. После этого вводятся фактические и пороговые значения показателей эффективности, весовые коэффициенты, которые выбираются экспертами. В процессе работы программы вычисляются взвешенные отклонения значений фактических показателей от критических (пороговых). При этом определяется значение целевой функции $Z(t)$ по следующей формуле:

$$Z(t) = \int_{t_{нач}}^{t_{кон}} \sum_{i=1}^j (X_i^n(t) - X_i^\Phi(t))^2 \cdot \mu_i \cdot dt \rightarrow \min, \quad (8)$$

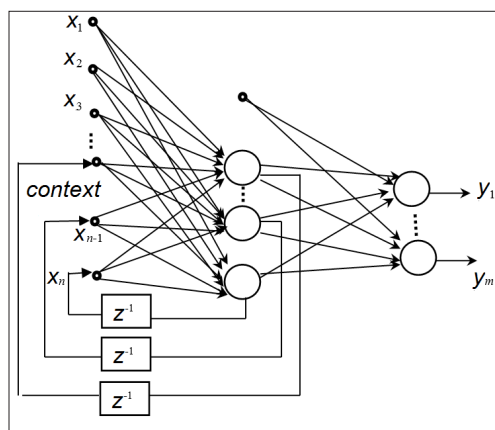
где $i = 1 \dots j$ – число показателей эффективности образовательной деятельности; μ_i – коэффициент (доля) i -го показателя эффективности; X_i^n – пороговое (критическое) значение

показателя эффективности; X_i^Φ – фактическое значение показателя эффективности; $0 < X_i^\Phi \leq 1$ – фактические показатели эффективности нормированы; $0 < X_i^n \leq 1$ – пороговые показатели эффективности подчинены нормальному закону распределения. В качестве начальных условий определим: $0 < X_{0i} \leq 1$. Управляющие воздействия $U(t) \in \bar{u}(t)$ – процедуры решений ЛПР, которые представляют собой линейные уравнения вида: $U(t) = at + b$; где $a, b > 0$; t – время.

Целевая функция $Z(t)$ позволяет оперативно управлять образовательной деятельностью вуза посредством варьирования значения показателей и весовых коэффициентов μ_i . Весовой коэффициент μ_i служит для гибкого планирования администрацией своей образовательной политики, определяя приоритеты в развитии вуза. С целью достижения необходимой точности и снижения погрешности расчетов определение значений целевой функции (8) необходимо производить 2 спо-



собами: 1) численным методом Симпсона; 2) с помощью искусственной нейронной сети *Elman backprop*. Сеть Элмана характеризуется частичной рекуррентностью в виде обратной связи между скрытым и входным слоями нейронов. Данная связь формируется с использованием единичных элементов запаздывания z^{-1} . Рекуррентные сети, по сути своей, являются потомками однонаправленных сетей персептронного типа. Архитектура искусственной нейронной сети *Elman backprop* представлена на рис. 4.



Р и с. 4. Архитектура *Elman backprop*

F i g. 4. The architecture of *Elman backprop*

Значения функции $Z(t)$ вычислялись по формуле (8), при заданном интервале $[t_{нач}; t_{кон}]$, равным соответственно $[0; 1]$ с шагом 0,1 месяца, $i = 1 \dots 8$ – количество показателей эффективности. Определим значения коэффициентов $\mu_i = const$ на всех интервалах времени, руководствуясь следующими приоритетами: для X_3 – международной деятельности вуза определим $\mu_1 = 0,2$; для X_6 – трудоустройства выпускников $\mu_2 = 0,2$; для X_8 – дополнительные показатели образовательных организаций $\mu_2 = 0,2$. Значения коэффициентов μ_i приведены в матрице-столбце:

$$\mu_i = \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \\ \mu_4 \\ \mu_5 \\ \mu_6 \\ \mu_7 \\ \mu_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,13 \\ 0,14 \\ 0,20 \\ 0,01 \\ 0,01 \\ 0,02 \\ 0,01 \\ 0,20 \end{pmatrix}.$$

Значения функции $Z(t)$, рассчитанные по методу Симпсона, приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Table 2

Значения функции $Z(t)$, рассчитанные по методу Симпсона

The values of function $Z(t)$, calculated by the Simpson method

Z	t
42,5	[0; 0,001]
376,0	[0; 0,1]
654,7	[0; 0,2]
883,3	[0; 0,3]
1066,3	[0; 0,4]
1208,1	[0; 0,5]
1312,7	[0; 0,6]
1384,3	[0; 0,7]
1426,5	[0; 0,8]
1443,0	[0; 0,9]
1437,3	[0; 10]

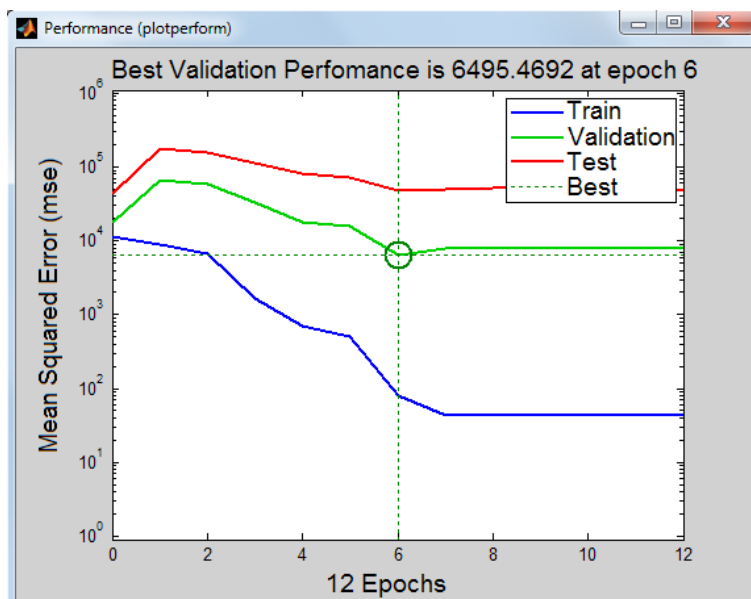
При создании и обучении нейронной сети обучающее множество было достаточно представительным и включало 15 значений целевой функции Z на заданном интервале. Нейронная сеть обучалась с заданным числом итераций – 1 000. Результаты обучения выводились через 25 итераций при погрешности расчетов 0. Сеть обучилась относительно быстро, пройдя 12 итераций:

[42,6448; 377,9812; 644,8256; 883,6781;
1066,3; 1195,3851; 1313.4688; 1385,3674;
1443,0096; 1443,0167; 1443,0099]

График расчета погрешности при обучении и вид тестовой кривой ней-

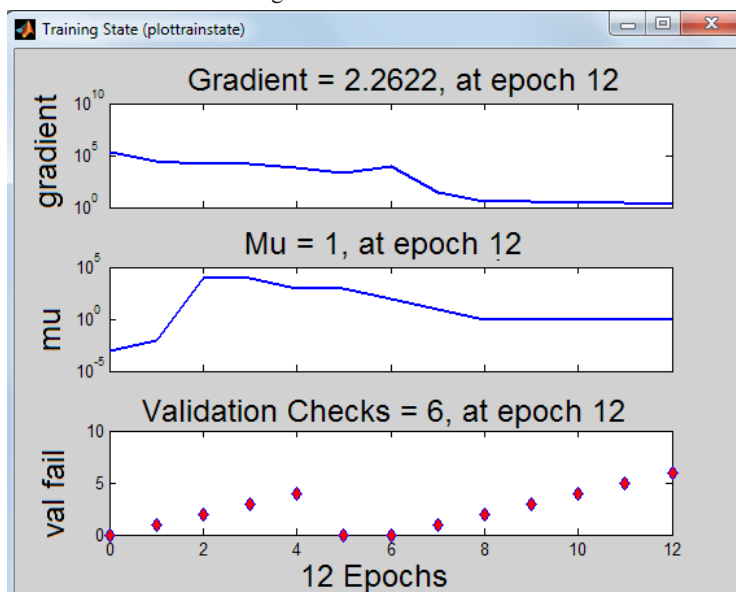
ронной сети представлены на рис. 5–6 соответственно.

Погрешность вычисления $Z(t)$ по методу Симпсона и с помощью искусственной нейронной сети составляет



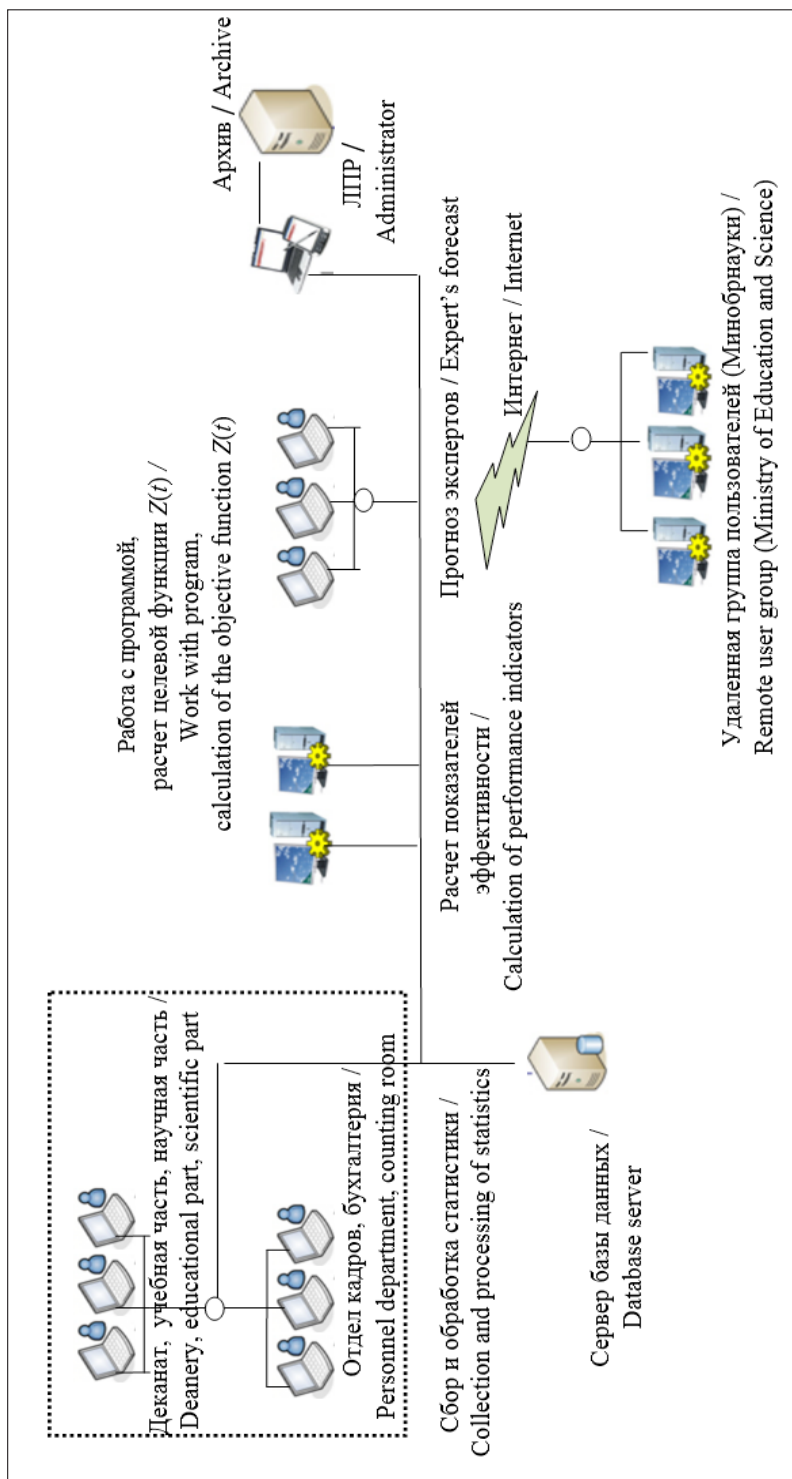
Р и с. 5. Расчет погрешности

F i g. 5. Calculation of error



Р и с. 6. Вид обучающей кривой

F i g. 6. The view of training curve



Р и с. 7. Схема проведения мониторинга вуза

F i g. 7. The scheme of the monitoring in the university

10–15 %. Подобный подход к вычислению квадратичного критерия $Z(t)$ двумя способами способствует снижению погрешности вычислений и увеличению точности расчетов.

«Модуль для определения эффективности деятельности высшего учебного заведения» предоставляет возможность архивирования вычисленных значений показателей эффективности в базе данных для последующего использования при проведении мониторинга.

Варьируя значения весовых коэффициентов μ_i в зависимости от текущей ситуации, ЛПР получает возможность оперативного управления образовательной деятельностью вуза. На рис. 7 показана схема проведения мониторинга в вузе с использованием разработанного программного обеспечения.

Приведем алгоритм практического применения разработанного математического и программного обеспечения в интегрированной среде вуза.

1. По собранным статистическим данным (отчетам, актам самообследования) формируется массив необходимой информации.

2. Исходные данные формализуются для проведения расчетов, по приведенной методике определяются показатели эффективности образовательной деятельности вуза.

3. Полученные показатели предоставляются в Министерство образования и науки РФ.

4. Рассчитываются прогнозные значения показателей с использованием модели (6) на заданном временном интервале. Возможные сценарии осуществления вузом образовательной деятельности анализируются экспертами с учетом прогнозных значений показателей эффективности.

5. Определяется величина отклонений фактических значений показателей эффективности от пороговых значений (рассчитывается квадратичный критерий $Z(t)$).

6. ЛПР (ректорат, директор, декан факультета) информируется о текущей ситуации в вузе. Если ситуация критическая (в случае значительного отклонения фактических показателей от пороговых значений) определяются возможные направления ее ликвидации.

Обсуждение и заключения

Разработанное математическое и программное обеспечение может найти широкое применение при мониторинге образовательной деятельности вуза для определения прогнозных значений показателей его эффективности. Это позволит существенно снизить вероятность возникновения критических ситуаций. Созданные модели, методы и программы предоставляют возможность оперативного управления вузом путем сравнения пороговых и фактических показателей эффективности и формирования гибкой образовательной стратегии для конкретного высшего учебного заведения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Модель для оценки состояния национальной безопасности России на основе теории системной динамики / А. Ф. Резчиков [и др.] // Прикладная информатика. 2017. Т. 68, № 2. С. 106–118. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29155311>
2. Наводнов В. Г., Мотова Г. Н. Практика аккредитации в системе высшего образования России // Высшее образование в России. 2015. № 5. С. 12–20. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/praktika-akkreditatsii-v-sisteme-vysshego-obrazovaniya-rossii>
3. Сухинин В. П., Горшенина М. В. Управление качеством проектирования образовательной среды вуза // Вестник Самарского государственного технического университета (Сер. «Психолого-педагогические науки»). 2014. Т. 23, № 3. С. 192–197. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23272608>



4. **Сухинин В. П., Горшенина М. В.** Диагностика образовательной среды вуза с помощью векторного моделирования // Вестник Самарского государственного технического университета (Сер. «Психолого-педагогические науки»). 2014. Т. 21, № 1. С. 186–192. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22790947>
5. **Яндыбаева Н. В., Кушников В. А.** Математические модели, алгоритмы и комплексы программ для мониторинга эффективности образовательной деятельности вуза // Проблемы управления. 2015. № 1. С. 53–63. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22958726>
6. **Яндыбаева Н. В.** Принцип системной динамики в управлении качеством образовательного процесса вуза // В мире научных открытий. 2010. № 2-3. С. 46–48. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15190515>
7. **Новиков Д. А.** Кибернетика 2.0 // Проблемы управления. 2016. № 1. С. 73–81. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25505770>
8. **Димитриади Г. Г., Ларичев О. И.** Система поддержки принятия решений и метод ЗАПРОС-III: ранжирование многокритериальных альтернатив с вербальными оценками качества // Автоматика и телемеханика. 2005. Т. 66, № 8. С. 146–160. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16287801>
9. **Codd E. F.** A relational model of data for large shared data banks // Communications of the ACM. 1970. Vol. 13 (6). P. 377–387. DOI: 10.1145/362384.362685
10. Data mining and knowledge Discovery – 1996 to 2005: overcoming the hype and moving from «University» to «Business» and «Analytics» Gregory Piatetsky-Shapiro, data mining and knowledge // Discovery Journal. 2007. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10618-006-0058-2>
11. Intelligence system for supporting human-computer interaction engineering processes / M. N. Sheriyev [et al.] // Applied Mathematics and Information Sciences. 2016. Vol. 10, № 3. P. 927–935. DOI: 10.18576/amis/100310
12. **Tuglular T., Belli F., Linschulte M.** Input contract testing of graphical user interfaces // International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering. 2016. Vol. 26, no. 2. P. 183–215. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26987153>
13. **Koo H. M., Ko I. Y.** An analysis of problem-solving patterns in open source software // International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering. 2015. Vol. 25, no. 6. P. 1077–1103. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25220031>
14. **Яндыбаева Н. В., Кожанова Е. Р., Кушников В. А.** Разработка программного продукта для определения эффективности деятельности высшего учебного заведения // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2014. Т. 75, № 2. С. 214–219. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22567751>

Поступила 13.11.2017; принята к публикации 27.12.2017; опубликована онлайн 20.03.2018

Об авторе:

Яндыбаева Наталья Валентиновна, доцент кафедры информационного и документационного обеспечения управления, Балаковский филиал ФГБОУ ВО «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации» (413865, Россия, г. Балаково, ул. Чапаева, д. 107), кандидат технических наук, ResearcherID: V-3314-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2145-6501>, nat07@inbox.ru

Автор прочитала и одобрила окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Rezchikov A. F., Kushnokov V. A., Yandybaeva N. V., Ivaschenko V. A., Bogomolov A. S., Filimonuk L. Yu. Model to assess the state of Russia's national security, based on system dynamics theory. *Prikladnaya informatika* = Applied Informatics. 2017; 2(68):106–118. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29155311> (In Russ.)

2. Navodnov V. G., Motova G. N. [The practice of accreditation in the system of higher education in Russia]. *Vysshye obrazovaniye v Rossii* = Higher Education in Russia. 2015; 5:12–20. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/praktika-akkreditatsii-v-sisteme-vysshego-obrazovaniya-rossii> (In Russ.)
3. Sukhinin V. P., Gorshenina M. V. Quality management design of the educational environment of the university. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Psikhologo-pedagogicheskiye nauki* = Samara State Technical University Bulletin. Psychological and Pedagogical Sciences. 2014; 23(3):192–197. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23272608> (In Russ.)
4. Sukhinin V. P., Gorshenina M. V. Diagnostics of the educational university environment by means of vector modeling. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Psikhologo-pedagogicheskiye nauki* = Samara State Technical University Bulletin. Psychological and Pedagogical Sciences. 2014; 21(1):186–192. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22790947> (In Russ.)
5. Yandybaeva N. V., Kushnikov V. A. [Mathematical models, algorithms and program complexes for monitoring the effectiveness of the educational activity of the university]. *Problemy upravleniya* = Management Problems. 2015; 1:53–63. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22958726> (In Russ.)
6. Yandybaeva N. V. [The principle of system dynamics in the management of the quality of the university educational process]. *V mire nauchnykh otkrytiy* = In the World of Scientific Discoveries. 2010; 2(3):46–48. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15190515> (In Russ.)
7. Novikov D. A. [Cybernetics 2.0]. *Problemy upravleniya* = Management Issues. 2016; 1:73–81. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25505770> (In Russ.)
8. Dimitriadis G. G., Larichev O. I. The decision support system and the ZAPROS-III method for ranking the multiattribute alternatives with verbal quality estimates. *Avtomatika i telemekhanika* = Automation and Telemekhanics. 2005; 66(8):146–160. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16287801> (In Russ.)
9. Codd E. F. A relational model of data for large shared data banks // *Communications of the ACM*. 1970; 13(6):377–387. DOI: 10.1145/362384.362685
10. Piatetsky-Shapiro G. Data mining and knowledge Discovery – 1996 to 2005: overcoming the hype and moving from “University” to “Business” and “Analytics”, data mining and knowledge. *Discovery Journal*. 2007. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10618-006-0058-2>
11. Sheriyev M. N., Atymtayeva L. B., Beissembetov I. K., Kenzhaliyev B. K. Intelligence system for supporting human-computer interaction engineering processes. *Applied Mathematics and Information Sciences*. 2016; 10(3):927–935. DOI: 10.18576/amis/100310
12. Tuglular T., Belli F., Linschulte M. Input contract testing of graphical user interfaces. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*. 2016; 26(2):183–215. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26987153>
13. Koo H. M., Ko I. Y. An analysis of problem-solving patterns in open source software. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*. 2015; 25(6):1077–1103. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25220031>
14. Yandybaeva N. V., Kozhanova E. R., Kushnikov V. A. Developing software to determine effectiveness of a higher school. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Saratov State Technical University Bulletin. 2014; 2(75):214–219. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22567751> (In Russ.)

Submitted 13.11.2017; revised 27.12.2017; published online 20.03.2018

About the author:

Natalya V. Yandybaeva, Associate Professor, Chair of Information and Document Support, Balakovo Branch of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (107 Chapayeva St., Balakovo 413865, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: V-3314-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2145-6501>, nat07@inbox.ru

The author has read and approved the final version of the manuscript.



Информация для авторов и читателей

1. Редакция журнала «Вестник Мордовского университета» принимает оригинальные научные статьи на русском и английском языках, соответствующие профилю Журнала и отражающие результаты теоретических и/или экспериментальных исследований авторов (кандидатов и докторов наук, преподавателей и аспирантов) по следующим направлениям:

01.04.00 Физика

05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление

05.20.00 Процессы и машины агроинженерных систем

Журнал приветствует статьи, содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Не допускается направление в редакцию ранее опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати). Мониторинг несанкционированного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и «CrossCheck».

2. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

3. Необходимо указать **УДК**.

4. **Заголовок статьи** должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного научного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

5. **Аннотация** (200–250 слов) выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

1) Введение (Introduction);

2) Материалы и методы (Materials and Methods);

3) Результаты исследования (Results);

4) Обсуждение и заключения (Discussion and Conclusions).

Приводится на русском и английском языках.

6. **Ключевые слова** (5–10) являются поисковым образом научной статьи. В связи с этим они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования. *Приводятся на русском и английском языках.*

7. **Благодарности.** В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам. *Приводятся на русском и английском языках.*

8. **Основной текст** статьи излагается на русском или английском языках.

1) Введение (1–2 стр.) – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

2) Обзор литературы (1–2 стр.). Необходимо описать основные (последние по времени) исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделение нерешенных вопросов в пределах общей проблемы, которым посвящена статья.

3) Материалы и методы (1–2 стр.). В данном разделе описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, использованная аппаратура; даются подробные сведения об объекте исследования; указывается последовательность выполнения исследования и обосновывается выбор используемых методов (наблюдение, опрос, тестирование, эксперимент, лабораторный опыт и т. д.).

4) Результаты исследования. Это основной раздел, цель которого – при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно приведенные данные. **Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.**

5) Обсуждение и заключения. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области.

9. **Список использованных источников** (оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008). Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 30–40 источников. Из них за последние 3 года – не менее 20, иностранных – не менее 15. Следует указать DOI или адрес доступа в сети Интернет. *Оформляется на русском и английском языках.*

10. **Аффилиация авторов.** Ф.И.О., организация(и), адрес организации(й) (требуется указать все места работы автора, в которых выполнялись исследования: постоянное место, место выполнения проекта и др.), должность и ученое звание, Researcher ID, ORCID ID, электронная почта, телефон, почтовый адрес для отправки авторского экземпляра. *Приводится на русском и английском языках.*

11. **Вклад соавторов.** В конце рукописи необходимо включить примечания, в которых разъясняется фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. *Приводится на русском и английском языках.*

При подаче статьи в редакцию автор соглашается с положениями размещенного на сайте лицензионного договора.

В журнале «Вестник Мордовского университета» принято «двустороннее слепое» рецензирование (рецензент и автор не знают имен друг друга).

Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации (без доработки или с доработкой) или ее отклонении. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

Политика редакционной коллегии журнала базируется на современных юридических требованиях в отношении клеветы, авторского права, законности и плагиата, поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей, закрепленных в Кодексе поведения и руководящих принципах наилучшей практики для редактора журнала и Кодексе поведения для издателя журнала, разработанных Комитетом по публикационной этике (COPE).

Допускается свободное воспроизведение материалов журнала в личных целях и свободное использование в информационных, научных, учебных и культурных целях в соответствии со ст. 1273 и 1274 гл. 70 ч. IV Гражданского кодекса РФ. Иные виды использования возможны только после заключения соответствующих письменных соглашений с правообладателем.

Электронные версии статей размещаются на сайте Научной электронной библиотеки. Журнал распространяется по подписке, заявкам высших учебных заведений, учреждений образования и отдельных лиц, а также путем рассылки номеров наложенным платежом.

Вдовин Сергей Михайлович – главный редактор. Тел.: +7 (8342) 24-48-88.

Сенин Петр Васильевич – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 23-32-60.

Гордина Светлана Викторовна – ответственный секретарь. Тел.: +7 (8342) 48-14-24.

Редактор – Л. А. Пудовкина

Перевод С. В. Голованова, Н. Н. Плеханковой

Компьютерная верстка Е. П. Гординой

Информационная поддержка Р. В. Карсева

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Подписано в печать 26.02.2018 г. Дата выхода в свет 30.03.2018 г.

Формат 70 × 100 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 11,38.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 250 экз. Заказ № 354. Свободная цена.

Адрес типографии: 430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Советская, д. 24

(Издательство федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»)



Information for authors and readers of the journal

1. “Mordovia University Bulletin” accepts scholarly articles and debatable academic materials in Russian, English from holders of the following degrees: Ph.D., D.Sc., lecturer, postgraduate student. Articles should conform to the subject of the journal and report on the results of theoretical and/or experimental studies of the authors.

The journal covers the following specialties:

01.04.00 Physics

05.13.00 Computer Science, Computer Engineering and Computer Facilities and Management

05.20.00 Processes and machines of argoengineering systems

Submission of a manuscript implies that the work described has not been published previously. In the case of simultaneous submission of manuscripts to several journals, the published article may later be retracted (i.e. withdrawn from the press). Monitoring of unauthorized citations is provided by services “AntiPlagiat” and “CrossCheck”. The journal gives preference to the articles with containing significant advances in considered areas of science.

2. If you translate your text into English, please do so in correct English (either American or British usage is accepted, but not a mixture of both).

3. It is necessary to indicate the **UDC** code.

4. The title of the article should be short and informative (less than 10 words) and should convey your essential points clearly.

The title is to be provided in Russian and English.

5. **The abstract** plays a role of an enhanced title. The abstract should state briefly the purpose of the research, the principal results and major conclusions (200-250 words). It consists of 4 distinct parts:

1) Introduction

2) Materials and Methods

3) Results

4) Discussion and Conclusions

The abstract is to be provided in Russian and English.

6. The structure of the paper should contain the **list of keywords** (5–10 words) in *Russian and English*. They should reflect basic statements, results achieved and the terminology of the investigation.

7. **Acknowledgements.** List in this section those individuals who provided help during the research (e.g., providing language help, writing assistance or proof reading the article, etc.). *The acknowledgements are to be provided in Russian and English.*

8. **The main body** of the article should be presented in Russian or in English.

1) Introduction (1–2 pp.) is the challenge of the problem treated, its relevance, its connection with the chief tasks to be solved, its importance for the development of a definite area of science or for practical activity.

2) Literature Review (1–2 pp.). It is necessary to describe the recent principal studies and publications relied upon by the author; modern views on the issue; difficulties in the development of the subject; the allotment of the outstanding issues within the general problem of the article.

3) Materials and Methods (1–2 pp.). This section describes the process of the experiment, using techniques and equipment; provides detailed information about the target of research; indicates the sequence of research and justifies the choice of methods used (observation, survey, test, experiment, laboratory experience, analysis, modeling, learning and generalization, etc).

4) Results. In this section should be presented systematic analytical and statistical material. The research results should be described adequately, so that the reader can trace the process and assess the validity of the conclusions made by the author. This is the main section, which aims to prove a working hypothesis (or hypotheses) by analysis, synthesis and data clarification.

5) Discussion and Conclusions. The conclusion must contain a brief summary of research results. The main points of the work must be repeated. It is better to present any repetition of the material with new formulations. It is necessary to compare the results with the target, indicated at the beginning of the article. In conclusion, the results are to be summarized from a theoretical and practical point of view; the main directions for further research are indicated in this area.

9. **Bibliography.** The bibliography should be drawn up strictly according to the GOST P 7.0.5-2008 and in uniform format.

It would be desirable to refer to papers published in indexed journals with impact factor.

It is advisable to refer to 30–40 sources.

Citations of articles published in “Mordovia University Bulletin” should include author, title, volume number, year, page number, DOI and/or URL.



10. **Institutional affiliation of authors:** first name, last name, the name of the institution, the address of the institution, the place where the project occurred, the position and academic title of the author, Researcher ID, ORCID ID, e-mail, phone number, postal address for delivery of obligatory copy (*in Russian and English*).

11. **Authors' contributions.** At the end of the manuscript, authors should explain in the notes the actual contribution of each collaborator in the work performed. The order of the authors and co-authors of the article must be consistent in itself (*in Russian and English*).

The author agrees to the terms of the enclosed license agreement by submission of the article.

The journal has adopted a "double blind" reviewing (reviewer and author are not familiar with each other).

A reviewer analyses an article and decides recommending it for publication (after revision of without it), additional reviewing or refusing of it. In case of noncompliance of an author with the comment of a reviewer, they can address a motivated statement to editorial council.

Editorial staff's policy is based on modern legal requirements concerning libel, copyright, legitimacy, plagiarism, ethical principles, kept in community of leading scientific issues publishers. Journal's editorial policy is based upon traditional ethical principles of Russian academic periodicals; it supports Academic Periodicals Ethical Codex, stated by Committee on Publication Ethics (Russia, Moscow) and it is formed in account of standards of ethics of editors' and publishers' work confirmed by Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and Code of Conduct for Journal Publishers, developed by Committee on Publication Ethics (COPE).

Free reproduction of journal's material is allowed for personal purposes. Free use is permitted for informational, academic, educational and cultural purposes in compliance of paragraphs 1273 and 1274 of chapter 70, part IV of Civil Codex of Russia. Other types of use are possible only after making agreements in writing with copyright holder.

Electronic copies of the journal with full text of the articles in PDF are in free access at the website of Academic Electronic Library. The journal is distributed by subscription, requests of universities, educational institutions and individuals and pay-on-delivery mailing.

Sergey M. Vdovin – Editor in Chief. Tel.: +7 (8342) 24-48-88.

Petr V. Senin – Deputy Editor in Chief. Tel.: +7 (8342) 23-32-60.

Svetlana V. Gordina – Executive Editor. Tel.: +7 (8342) 48-14-24.

Editor *L. A. Pudovkina*

Translation *S. V. Golovanov, N. N. Plekhankova*

Desktop publishing *E. P. Gordina*

Informational support *R. V. Karasev*

Distributed in Russian Federation and foreign countries.

Signed to print 26.02.2018. Date of publishing 30.03.2018.

Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 11,38.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 250 copies. Order no. 354. Free price.

Address of the Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia
(Publishing House of National Research Mordovia State University)