

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Известия
Юго-Западного
государственного
университета**

Научный журнал

Том 23 № 2 / 2019



**Proceedings
of the Southwest
State University**

Scientific Journal

Vol. 23 № 2 / 2019



Известия Юго-Западного государственного университета (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1997 г.

До 2011 года журнал издавался под названием
«Известия Курского государственного технического университета».

Цель издания – публичное представление научно-технической общественности научных результатов фундаментальных, проблемно-ориентированных научных исследований в таких областях, как технология и оборудование механической и физико-технической обработки, сварка, роботы, мехатроника и робототехнические системы, управление в социальных и экономических системах, методы и системы защиты информации, информационная безопасность, автоматизация и управление технологическими процессами, строительные конструкции, теплоснабжение, вентиляция, газоснабжение и освещение, строительная механика.

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

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

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

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

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

Машиностроение и машиноведение: 05.02.05; 05.02.07; 05.02.10.

Информатика, вычислительная техника и управление: 05.13.01; 05.13.06; 05.13.10; 05.13.19.

Строительство: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Бредихин Владимир Викторович, д-р экон. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

Бертрам Торстен, д-р техн. наук, профессор, Институт теории управления и системного проектирования Технического университета (г. Дортмунд, Германия);

Гриднев Сергей Юрьевич, д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Россия);

Ежов Владимир Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, Изобретатель СССР, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия);

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

Ивахненко Александр Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия);

Колмыков Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия);

Колчунов Владимир Иванович, член РААСН, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия);

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

Латыпов Рашит Абдулхакович, д-р техн. наук, профессор, Московский политехнический университет (г. Москва, Россия);

Локтионова Оксана Геннадьевна, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия);

Шах Райнер, д-р техн. наук, профессор, Дрезденский технический университет (г. Дрезден, Германия).

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Агеев Евгений Викторович, д-р техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Алексеев Юрий Владимирович, д-р архитектуры, профессор; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (г. Москва, Россия);

Бобырь Максим Владимирович, д-р техн. наук, доцент; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Бок Томас, д-р техн. наук, профессор, Мюнхенский технический университет (г.Мюнхен, Германия);

Бьянко Лино, д-р философии (PhD), профессор международной академии архитектуры, профессор Университета архитектуры, строительства и геодезии (г. София, Болгария), старший преподаватель Университета Мальты (Мальта);

Дегтярев Сергей Викторович, д-р техн.наук, профессор; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Димитров Любомир Ванков, д-р техн. наук, профессор, Технический университет Софии (г.София, Болгария);

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

Кобелев Николай Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Колчунов Виталий Иванович, академик РААСН, д-р техн.наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Кузнецов Сергей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Россия);

Кукарас Даниэль, д-р философии (PhD), профессор, факультет гражданского строительства, Нови-Садский университет (г.Суботица, Сербия);

Куц Вадим Васильевич, д-р техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Пановко Григорий Яковлевич, д-р техн. наук, профессор, Институт машиноведения РАН (г.Москва, Россия);

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

Смирнов Игорь Михайлович, д-р техн. наук, доцент, член-корреспондент РАН, АО «Научно-исследовательский инженерный институт» (г. Балашиха, Россия);

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

Турков Андрей Викторович, д-р техн. наук, профессор, Орловский государственный университет им. И.С.Тургенева (г.Орел, Россия);

Щербаков Владимир Иванович, д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (г.Воронеж, Россия);

Яцун Сергей Федорович, д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки России, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия).

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Адрес учредителя и издателя:

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

Телефон: (4712) 22-25-26,

Факс: (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (ПИ №ФС77-42691 от 16.11.10).

ISSN 2223-1560 (Print)

Префикс DOI:10.21869

Сайт журнала: <https://science.swsu.ru>

Типография:

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

Подписка и распространение:

журнал распространяется
по подписке.

Подписной индекс журнала 41219
в объединенном каталоге
«Пресса России».

Периодичность: один раз в два месяца

Свободная цена.

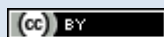
Оригинал-макет подготовлен Е.В. Мельник

Подписано в печать 23.04.19. Формат 60х84/8.

Бумага офсетная. Усл.печ.л. 23,2.

Тираж 1000 экз. Заказ 35.

© Юго-Западный государственный университет, 2019



Материалы журнала доступны
под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License



Proceedings of the Southwest State University (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)

Peer-reviewed scientific journal

Published since 1997

Before 2011

““Proceedings of Kursk State Technical University”

These Proceedings present the results of scientific fundamental and applied research in such areas as mechanical technologies and equipment; machine building; physical and engineering processing of materials; welding; robotics, mechatronics and robot systems, management and administration of social and economic systems; information protection methods and systems; information security; production process automation and control; building structures; heat supply; ventilation; gas supply and lightning systems; construction mechanisms and machines.

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

All papers are published free of charge.

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

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

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

Machine building: 05.02.05; 05.02.07; 05.02.10.

IT, computer engineering and control systems: 05.13.01; 05.13.06; 05.13.10; 05.13.19.

Construction engineering: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

EDITOR-IN-CHIEF

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

DEPUTY EDITOR

Vladimir V. Bredikhin, Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, RAACS Advisor, Southwest State University (Kursk, Russia)

EDITORIAL COUNCIL

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

Torsten Bertram, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Institute of Control Theory and System Design, Technical University of Dortmund (Dortmund, Germany);

Sergey Yu. Gridnev, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

Vladimir S. Ezhov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Igor V. Zotov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Alexander G. Ivakhnenko, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Valerii I. Kolmykov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Vladimir I. Kolchunov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RAACS Advisor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Nikolay A. Korenevskii, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Rashit A. Latypov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Moscow Polytechnic University (Moscow, Russia);

Oksana G. Loktionova, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Schah R., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Technical University of Dresden (Dresden, Germany)

EDITORIAL BOARD

Yevgenii V. Ageev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Yurii V. Alekseev, Doctor of Architecture Sciences, Professor, Moscow State National Research University of Civil Engineering (Moscow, Russia);

Maksim V. Bobyr, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Thomas Bock, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Technical University of Munich (Munich, Germany);

Lino Bianco, Doctor of Philosophy Sciences, Professor of IAA, Visiting Professor at UACEG (Sofia), Senior Lecturer, University of Malta (Malta);

Sergey V. Degtyarev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Lyubomir V. Dimitrov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Technical University of Sofia (Sofia, Bulgaria);

Zhanybaj T. Zhusubaliyev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Nikolai S. Kobelev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Vitalii I. Kolchunov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Academician of RAACS, Southwest State University (Kursk, Russia);

Sergey N. Kuznetsov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

Vadim V. Kuts, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Danijel Kukaras, Associate Professor, PhD, University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering (Subotica, Serbia);

Grigorii Ya. Panovko, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia);

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

Igor M. Smirnov, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Corresponding Member of RARAN, JSC "Research engineering Institute» (Balashikha, Russia);

Vitalii S. Titov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Andrey V. Turkov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Orel State University named after I.S. Turgenev (Orel, Russia);

Vladimir I. Shcherbakov, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

Sergey F. Yatsun, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

Founder and Publisher :
"Southwest State University"

Official address of the Publisher:
305040, Russia, Kursk, ul. 50 Let Oktyabrya, 94
Phone: (+74712) 22-25-26,
Fax: (+74712) 50-48-00.
E-mail: rio_kursk@mail.ru

The Journal is officially registered by:
The Federal Supervising Authority in the Field of Communication,
Information Technology and Mass media
(PI №FS77-42691 of 16.11.10).

ISSN 2223-1560 (Print)

DOI:10.21869

Web-site: <https://science.swsu.ru>

Printing office:

Printing Center
of the Southwest State University,
305040, Russia, Kursk,
ul. 50 Let Oktyabrya, 94

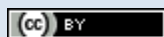
Subscription and distribution:
the journal is distributed by subscription.
Subscription index 41219 in the General Catalogue "Pressa Rossii"

Frequency: once in two months

Free-of-control price.

Original lay-out design: E. Mel'nik

© Southwest State University, 2019



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

Sent to the printer 23.04.19. Format 60x84/8.
Offset paper. Printer's sheets: 23,2.
Circulation 1000 copies. Order 35.

СОДЕРЖАНИЕ

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Подъем груза в экзоскелете с гравитационной компенсацией	8
<i>Яцун С.Ф., Антипов В.М., Карлов А. Е., Аль Манджи Хамиль Хамед Мохаммед</i>	
Способы оценки реальных размеров дефектов на основе длин их фронтальных образов	18
<i>Давыдов М. Н., Липатова А. П., Ткаченко Ю. С.</i>	
Влияние режимов высокотемпературной термомеханической обработки на механические свойства арматурного проката	29
<i>Сергеев Н. Н., Сергеев А. Н., Кутепов С. Н., Гвоздев А. Е., Агеев Е. В.</i>	
Комплексирование данных системы управления мобильным роботом с использованием расширенного фильтра Калмана	53
<i>Безмен П.А.</i>	
Исследование пористости спеченных образцов электроэрозионной порошковой меди	65
<i>Агеева Е. В., Локтионова О. Г., Куц В. В., Хорьякова Н. М.</i>	

СТРОИТЕЛЬСТВО

Исследование процесса генерации термоэлектричества при утилизации низкопотенциального тепла сбросных газов	74
<i>Ежов С. В., Семичева Е. Н., Бурцев А. П., Зенченков В. И., Ермаков Д. А.</i>	
Исследование теплового режима зданий ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» с разработкой мероприятий по повышению энергетической эффективности.....	85
<i>Умеренков Е.В., Умеренкова Э.В., Семичева Н.Е., Насонова А.А., Сазонова А.А.</i>	

ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Идентификация момента инерции якоря двигателя постоянного тока и нагрузки в экспериментальной вибрационной установке для исследования хаотической динамики.....	97
<i>Рубанов В.Г., Бушуев Д.А., Паращук Е.М., Трикула А. К.</i>	
К вопросу устойчивости прогнозирующей модели на основе кратномасштабного вейвлет-преобразования	109
<i>Сакрутина Е.А.</i>	
Выявление потерь электроэнергии на основе систематизации учетных данных	124
<i>Степанов И.И., Ганюкова Н.П., Ханова А.А.</i>	
Реконфигурируемая вычислительная модульная система	137
<i>Шевелев С.С.</i>	
Исследование и организация приоритетных режимов в сетевой распределенной вычислительной системе с архитектурой в виде облачного сервиса	153
<i>Мустафа Садек Джафар</i>	
Оценка эффективности локальной вычислительной сети при решении главной и обеспечивающих задач	174
<i>Николаев В. Н., Розатин С. И., Коломиец Е. А., Атакищев О. И.</i>	
Информационные технологии для оценки риска здоровью населения от выбросов полигона твердых коммунальных отходов	186
<i>Кирильчук И.О., Кондратьева О.Е., Локтионов О.А., Юшин В.В.</i>	
К сведению авторов	202

CONTENT

ORIGINAL ARTICLES

MECHANICAL ENGINEERING AND ENGINEERING SCIENCE

Load Lifting in the Exoskeleton with Gravity Compensation	8
<i>Yatsun S. F., Antipov V. M., Karlov A. Ye., Al Manji Hamil Hamed Mohammed</i>	
Methods for Estimating the Actual Size of Defects Based on the Lengths of Their Frontal Images	18
<i>Davydov M. N., Lipatova A. P., Tkachenko Y. S.</i>	
Influence of Operating Modes of High-Temperature Thermomechanical Processing on Mechanical Properties of Reinforcing Bars	29
<i>Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V.</i>	
Integration of Mobile Robot Control System Data Using the Extended Kalman Filter	53
<i>Bezmen P. A.</i>	
Study of Porosity of Sintered Samples of Electroerosive Powder Copper	65
<i>Ageeva Y. V., Loktionova O. G., Kuts V. V., Khorkova N. M.</i>	

CONSTRUCTION

Study of the Process of Generation of Thermoelectricity in Low Grade Heat Recovery of Waste Gases.....	74
<i>Ezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., Zenchenkov V. I., Ermakov D. A.</i>	
The Study of Buildings' Thermal Mode with the Development of Actions for Power Efficiency Increase (on the Example of "Southwest State University")	85
<i>Umerenkov E. V., Umerenkova E. V., Semicheva N. E., Nasonova A. A., Sazonova A. A.</i>	

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING

Identification of Anchor Inertia Motor Moment of Direct Current and Loading in Experimental Vibration Installation for Chaotic Dynamics Study	97
<i>Rubanov V. G., Bushuev D. A., Parashchuk E. M., Trikula A. K.</i>	
To a Question of Predicting Model Stability on the Basis of Multiple Scale Wavelet Transformation	109
<i>Sakrutina E. A.</i>	
Identification of Electric Power Losses on the Basis of Systematization of Registration Data	124
<i>Stepanov I. I., Ganyukova N. P., Khanova A. A.</i>	
Reconfigurable Modular Computing System	137
<i>Schevelev S. S.</i>	
Research and Organization of Priority Modes in a Network Distributed Computing System with Cloud Service Architecture	153
<i>Mustafa Sadeq Jaafar</i>	
Assessment of Local Area Network Effectiveness when Solving the Main and Supporting Tasks.....	174
<i>Nikolaev V. N., Rogatin S. I., Kolomiyets E. A., Atakishchev O. I.</i>	
Information Technologies for Assessing the Risk to Public Health from Emissions of Municipal Solid Waste Landfills	186
<i>Kiril'chuk I. O., Kondrat'yeva E., Laktionov O. A., Yushin V. V.</i>	
Information for Authors	202

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

**MECHANICAL ENGINEERING
AND ENGINEERING SCIENCE**

УДК 62-52

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-8-17

Подъем груза в экзоскелете с гравитационной компенсацией**С.Ф. Яцун ✉, В.М. Антипов, А. Е. Карлов,
Аль Манджи Хамиль Хамед Мохаммед**

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. В настоящее время широкое распространение получают экзоскелеты, существенно повышающие возможности человека в части облегчения движения, переноса тяжестей и различных видов деятельности, требующих значительных усилий. Особенно эффективными оказываются экзоскелеты, позволяющие осуществлять сложные виды движения как нижних, так и верхних конечностей, что существенно расширяет возможности человека при выполнении разгрузочно-погрузочных работ. Сравнительно недавно начались разработки экзоскелетов, в которых находят применение элементы гравитационной компенсации, поэтому проведение исследований энергетических затрат в процессе подъема груза и изучение влияния гравитационных компенсаторов на величину моментов, создаваемых электроприводами бедренного и коленного шарниров, являются актуальными и определяются из данной работы.

Методы. Для решения поставленных задач использовались методы системного анализа, проектирования биотехнических систем, теории управления, теории механизмов и машин, методы математического моделирования динамических систем, методы оптимального планирования и проектирования. При создании программных продуктов использованы математические пакеты Matlab/Simulink.

Результаты. Показано, что применение гравитационных компенсаторов позволяет значительно снизить нагрузку на электроприводы. Движение груза происходит за счет работы двигателей, расположенных в зоне голеностопного, коленного и бедренного суставов. Так как при подъеме груза движение экзоскелета происходит в сагиттальной плоскости, то положение звеньев экзоскелета в пространстве определяется четырьмя независимыми параметрами.

Заключение. Разработана математическая модель подъема груза человеком в экзоскелете. Выполнено математическое моделирование процесса подъема груза с помощью электроприводов экзоскелета. Особое внимание уделено изучению влияния гравитационных компенсаторов на величину моментов, создаваемых электроприводами бедренного и коленного шарниров. Показано, что применение гравитационных компенсаторов позволяет значительно снизить нагрузку на электроприводы. Также проведено исследование энергетических затрат в процессе подъема груза.

Ключевые слова: экзоскелет; гравитационная компенсация; подъем груза; математическая модель.

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

© Яцун С.Ф., Антипов В.М., Карлов А. Е., Аль Манджи Хамиль Хамед Мохаммед, 2019

Для цитирования: Подъем груза в экзоскелете с гравитационной компенсацией / С.Ф. Яцун, В.М. Антипов, А. Е. Карлов, Аль Манджи Хамиль Хамед Мохаммед // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 8-17. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-8-17.

UDC 62-52

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-8-17

Load Lifting in the Exoskeleton with Gravity Compensation

Sergey F. Yatsun ✉, Vladimir M. Antipov, Andrey Ye. Karlov,
Al Manji Hamil Hamed Mohammed

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

Purpose of research. Currently, exoskeletons are getting widespread use. They enhance human capabilities in terms of ease of movement, carrying loads and different types of activities that require considerable effort. Especially effective are those exoskeletons that make it possible to make complex types of movement of both for the lower and upper limbs, which significantly expands the capabilities of a person when performing loading and unloading operations. Relatively recently, they have started the development of exoskeletons which use the elements of gravity compensation. Therefore, the study of energy costs in the process of load lifting and the study of gravitational compensators influence on the magnitude of moments made by the electric drives of the femoral and knee joints, is relevant and is revealed in this paper.

Methods. Methods of system analysis, design of biotechnical systems, control theory, theory of mechanisms and machines, methods of mathematical modeling of dynamic systems, methods of optimal planning and design were used to solve the problems. Mathematical packages Matlab/Simulink were used to make software products.

Results. The study shows that the use of gravity compensators can significantly reduce the load on electrodrives. The movement of load is due to the operation of engines located in the area of ankle, knee and thigh joints. Since the movement of the exoskeleton occurs in the sagittal plane during load lifting, the position of the exoskeleton links in space is determined by four independent parameters.

Conclusion. The mathematical model of load lifting by a man in an exoskeleton has been developed. Mathematical modeling of the process of load lifting with the help of exoskeleton electric drives has been made. A special attention is paid to the study of gravitational compensators influence on the magnitude of moments created by the electric drives of femoral and knee joints. It shows that the use of gravity compensators can significantly reduce the load on electric drives. Also, the study of energy costs in the process of load lifting has been conducted.

Keywords: exoskeleton; gravity compensation; load lifting; mathematical model.

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

For citation: Yatsun S. F., Antipov V. M., Karlov A. Ye., Al Manji Hamil Hamed Mohammed. Load Lifting in the Exoskeleton with Gravity Compensation. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(2): 8-17 (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-8-17.

Введение

В настоящее время широкое распространение получают экзоскелеты Fortis,

HULC, HAL, Panasonic и другие, существенно повышающие возможности человека в части облегчения движения, пе-

реноса тяжестей и различных видов деятельности, требующих значительных усилий. Особенно эффективными оказываются экзоскелеты, позволяющие осуществлять сложные виды движения как нижних, так и верхних конечностей [1-3], что существенно расширяет возможности человека при выполнении разгрузочно-погрузочных работ.

Сравнительно недавно начались разработки экзоскелетов, в которых находят применение элементы гравитационной компенсации. Термин «гравитационная компенсация» и его английский аналог «gravity compensation» используются для обозначения свойства отдельных звеньев механизма иметь статически устойчивые положения, не зависящие от вертикального перемещения звеньев. Для внешнего наблюдателя движение этих звеньев механизма выглядит так, как если бы на них не действовало гравитационное поле.

В таких экзоскелетах одно или несколько его звеньев имеют статически устойчивые положения, не зависящие от их вертикального перемещения (под вертикальным перемещением здесь и далее подразумевается движение вдоль линий гравитационного поля). При этом подразумевается, что для сохранения указанного свойства механизму не требуется работа приводов.

Материалы и методы решения задачи

Механизмы с гравитационной компенсацией делятся на три типа:

1. Механизм экзоскелета с дополнительными массами для изменения положения центра масс.

2. Механизм экзоскелета с упругими элементами для создания сил, компенсирующих силу тяжести.

3. Механизмы, использующие трение в шарнирных соединениях и приводах.

Механизмы, относящиеся к первому типу [1], проектируются таким образом, чтобы сила тяжести, действующая на звено, для которого проводится гравитационная компенсация, проходила через ось вращения, например через шарнирное соединение со стойкой. Для подобных механизмов характерны ряд преимуществ, связанных с высокой надежностью работы. Недостатком такого рода механизмов является увеличение массы звеньев, что приводит к увеличению их инерционности и оказывает негативное влияние на работу экзоскелета [1-2].

Механизмы второго типа являются наиболее перспективными [1-3]. Для подобных механизмов характерны ряд преимуществ, связанных с достижением результата при минимальном увеличении веса конструкции экзоскелета.

Механизмы, относящиеся к третьей категории, также широко применяются в робототехнике, здесь статическое равновесие положения механизма достигается за счет применения управляемой силы трения в шарнирных соединениях и приводах. Недостатком устройств такого типа является то, что в процессе эксплуатации механизма

фрикционные свойства отдельных пар трения могут изменяться, что приводит к потере механизмом свойств гравитационной компенсации [2].

2. Результаты и их обсуждение

Рассмотрим схему подъема груза человеком с использованием экзоскелета (рис. 1). На данном этапе рассмотрим гравитационный механизм второго типа. Представим расчетную схему человека в экзоскелете в виде многосвязной системы твердых тел, связанных между собой шарнирами. Предполагается, что нижние конечности человека и звенья экзоскелета движутся одинаково и представляют 7 твердых тел, связанных между собой цилиндрическими шарнирами, оснащенными электроприводами. Руки расположены вертикально и удерживают груз массой m_8 . Стопы че-

ловека не отрываются от опорной поверхности.

Движение груза происходит за счет работы электроприводов, расположенных в зоне голеностопного, коленного и бедренного суставов. Так как при подъеме груза движение экзоскелета происходит в сагиттальной плоскости, то положение звеньев экзоскелета в пространстве можно определить с помощью 4 независимых параметров.

Таким образом, четыре угла задают положение экзоскелета.

$$\bar{q} = (\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_6)^T. \quad (1)$$

Будем искать вектор обобщенных координат $\bar{q}$. Пусть дана блочная вектор-функция $\bar{F}(\bar{q})$, которая определяет значения, соответствующие проекциям центра масс и груза в зависимости от обобщенных координат $\bar{q}$.

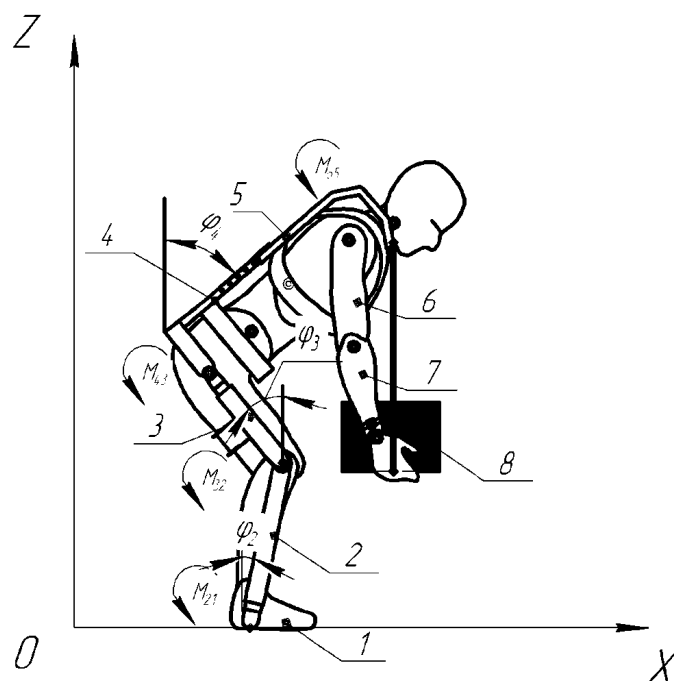


Рис. 1. Схема человека в экзоскелете при подъеме груза

$$\bar{F}(\bar{q}) = [\bar{S}_{80}(\bar{q}), \bar{r}_c(\bar{q})]^T. \quad (2)$$

Введем также вектор-функцию:

$$\bar{\Phi}(t) = [x_8(t), y_8(t), x_c(t), y_c(t)]^T, \quad (3)$$

которая определяет положение центра масс и груза на заданных траекториях. Так как

$$\bar{F}(\bar{q}) = \bar{\Phi}(t), \quad (4)$$

то получим уравнение (3), из решения которого можно определить значения вектора $\bar{q}$ по заданной функции $\bar{\Phi}(t)$. Для получения решения этого уравнения продифференцируем (3) по времени:

$$\frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{q}} \dot{\bar{q}} = \dot{\bar{\Phi}}(t). \quad (5)$$

Отсюда,

$$\dot{\bar{q}} = \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{q}} \right)^{-1} \dot{\bar{\Phi}}(t). \quad (6)$$

Обозначим обратную матрицу Якоби

$$J^{-1} = \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{q}} \right)^{-1}. \quad (7)$$

Тогда, в дискретной форме выражение (6) можно представить в виде:

$$\bar{q}^{k+1} = \bar{q}^k + \alpha_k J^{-1} \Delta \bar{\Phi}(t). \quad (8)$$

Все четыре этапа подъема груза экзоскелетом изображены на рисунке 2.

Зависимости абсолютных углов поворота звеньев (спина, бедро, голень) получены в результате решения обратной задачи кинематики (рис. 3).

Далее, зададим изменение нормальной реакции (рис. 4) в виде полинома третьего порядка:

$$N_{80} = (0, \sum_{i=0}^3 k_i t^i)^T. \quad (9)$$

Подъем груза разделим на четыре этапа. Первый – подход к грузу, второй – захват груза руками, третий – отрыв груза от поверхности, четвертый – подъем груза.

Силы и моменты, действующие на груз, представим в виде двух векторов.

$$\bar{\Phi}_{80} = (R_{80}, \bar{M}_{80})^T. \quad (10)$$

$$\bar{\Phi}_{87} = (F_{87}, \bar{M}_{87})^T.$$

(11)

Эти векторы равны между собой

$$\bar{\Phi}_{80} = \bar{\Phi}_{87}. \quad (12)$$

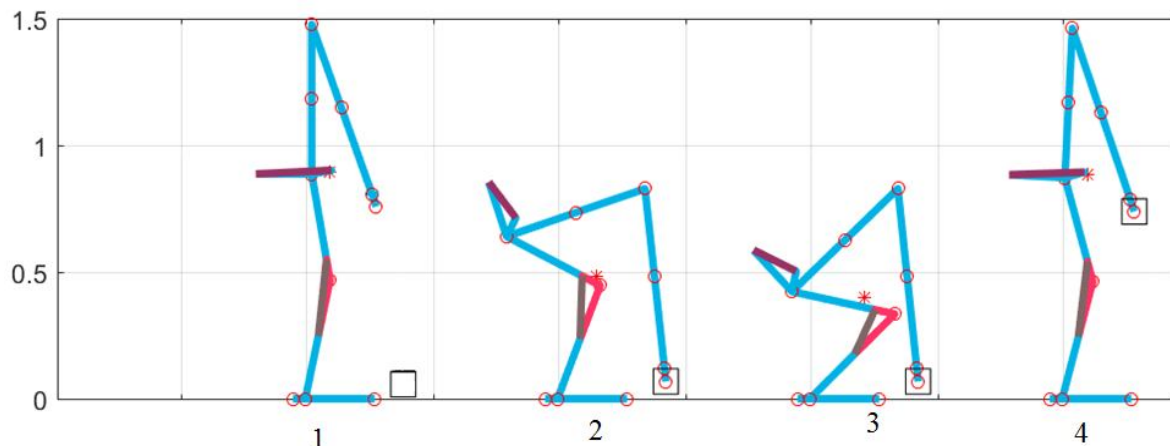


Рис. 2. Положение человека в экзоскелете в различные моменты времени

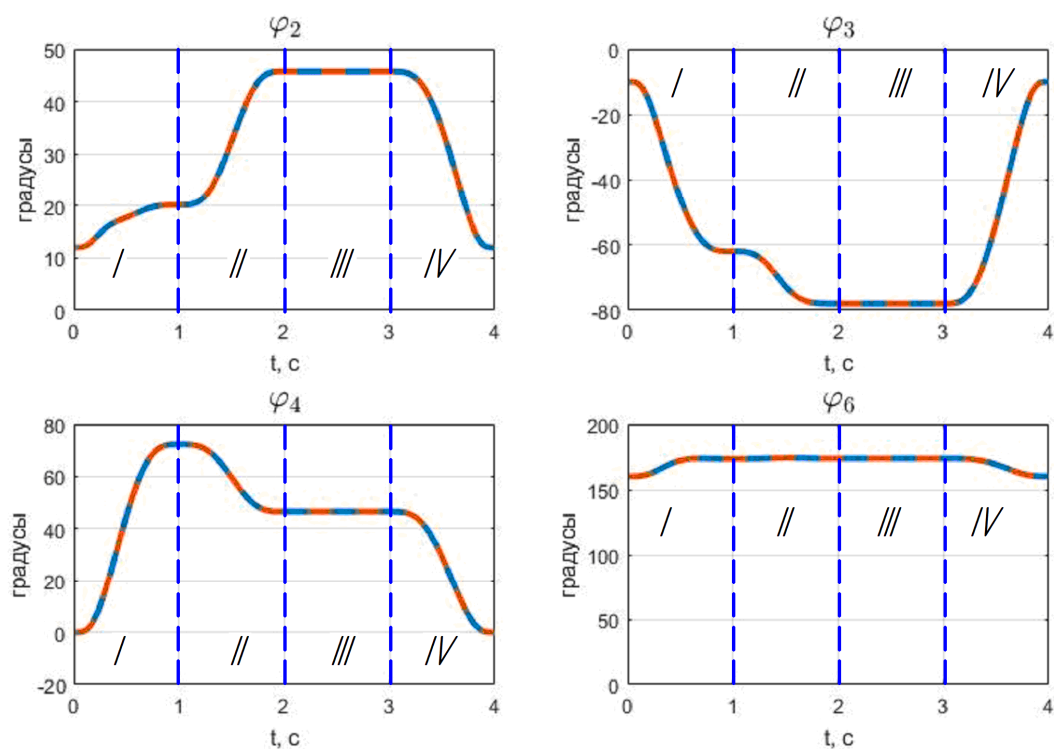


Рис. 3. Зависимость абсолютных углов, определяющих положение звеньев экзоскелета во времени

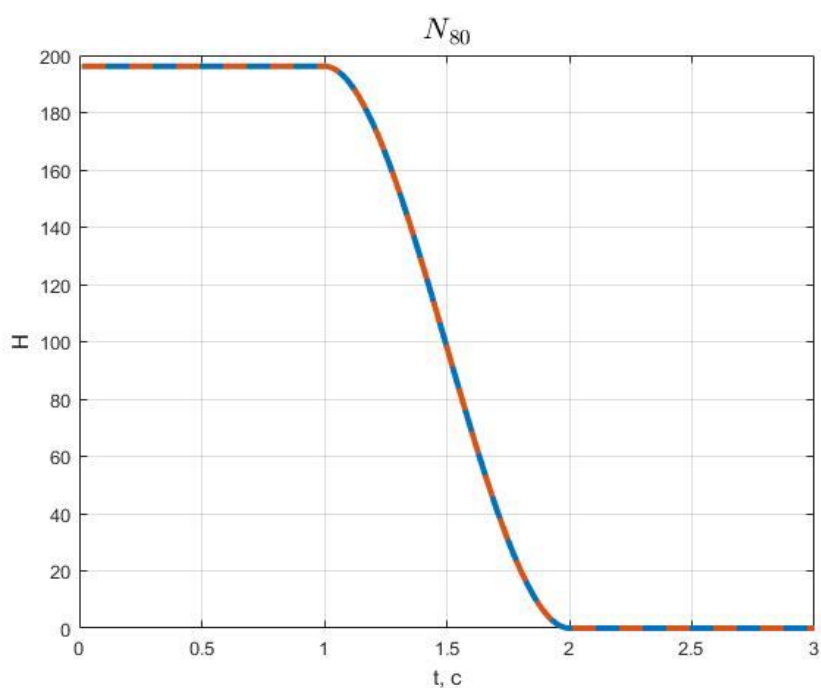


Рис. 4. Зависимость нормальной реакции от времени

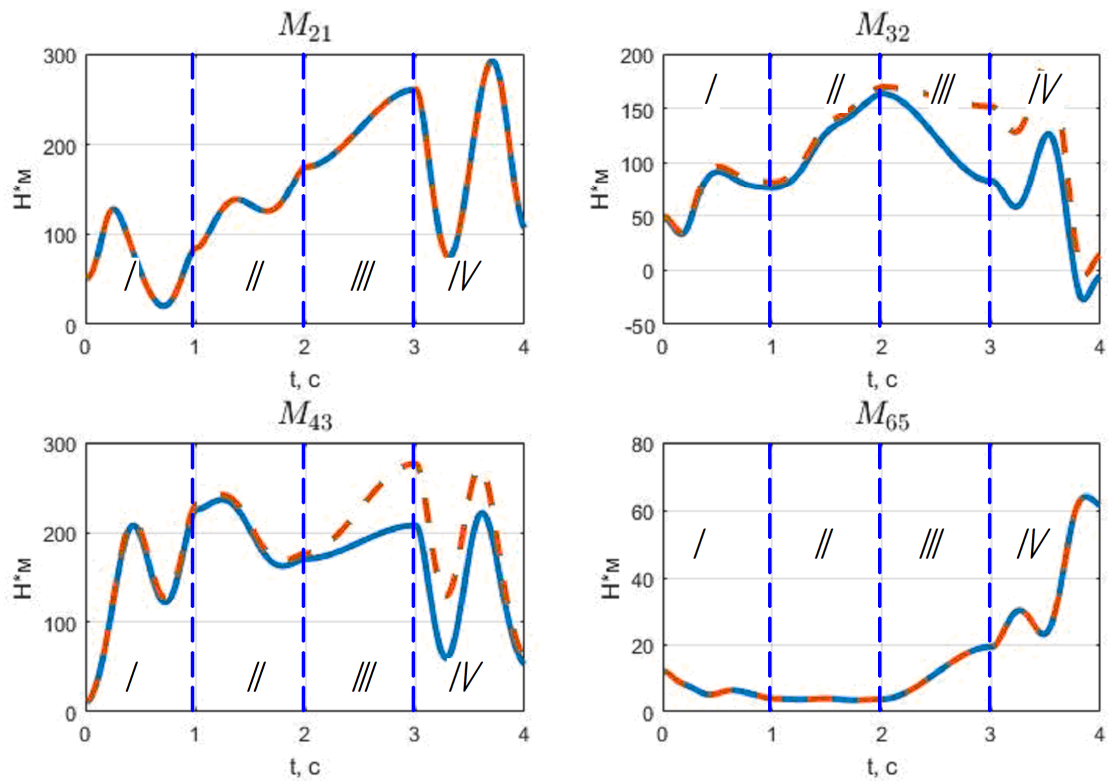


Рис. 5. Зависимость моментов от времени

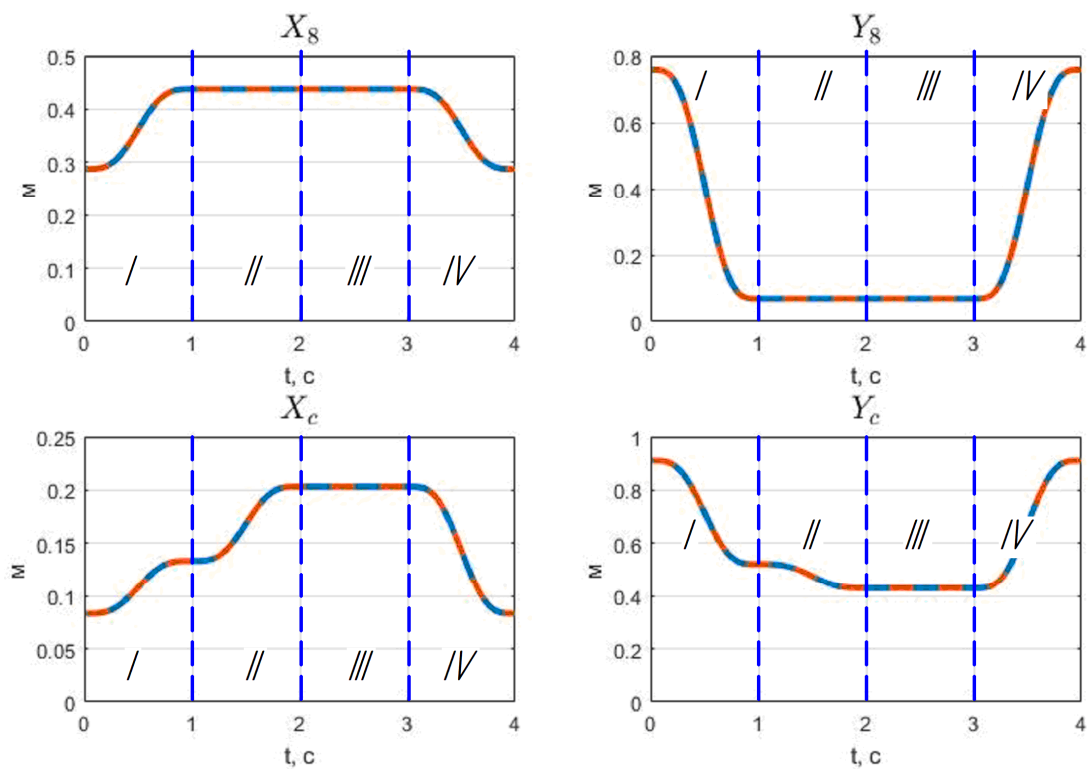


Рис. 6. Зависимость координат, определяющих положение груза от времени

Пусть вектор $\bar{S}_{80} = (x_{80} y_{80} \varphi_{80})^T$ определяет положение груза как при нахождении на поверхности, так и при отрыве. Моменты, действующие в соответствующих шарнирах, образуют вектор

$$\bar{M} = (M_{21} \ M_{32} \ M_{43} \ M_{65})^T. \quad (13)$$

Определить этот вектор можно по формуле

$$\bar{M}^T = J(\bar{q}) \bar{\Phi}_{80}^T, \quad (14)$$

$$\text{где } J(\bar{q}) = \frac{\partial \bar{S}_{80}(\bar{q})}{\partial \bar{q}}. \quad (15)$$

По заданному вектору $\bar{q}$ необходимо определить вектор моментов электроприводов.

Поставив все выражения, получим:

$$\bar{M}_{ed} = A \ddot{\bar{q}} + \dot{A} \dot{\bar{q}} - \frac{1}{2} \dot{\bar{q}}^T \left(\frac{A \dot{\bar{q}}}{\partial \bar{q}} \right) + \frac{\partial \Pi}{\partial \bar{q}}, \quad (16)$$

$$\bar{M}_{ed} = A \ddot{\bar{q}} + \left(\dot{A} - \frac{1}{2} \left(\frac{A \dot{\bar{q}}}{\partial \bar{q}} \right)^T \right) \dot{\bar{q}} + \frac{\partial \Pi}{\partial \bar{q}}. \quad (17)$$

В результате проведения всех вычислений получим значения моментов электроприводов от времени (рис. 5).

Выводы

В статье разработана математическая модель подъема груза человеком в экзоскелете. Выполнено математическое моделирование процесса подъема груза с помощью электроприводов экзоскелета. Особое внимание уделено изучению влияния гравитационных компенсаторов на величину моментов, создаваемых электроприводами бедренного и коленного шарниров. Показано, что применение гравитационных компенсаторов позволяет значительно снизить нагрузку на электроприводы. Также проведено исследование энергетических затрат в процессе подъема груза.

Список литературы

1. Yatsun S., Savin S., Yatsun A., Turlapov R., Adaptive control system for exoskeleton performing sit-to-stand motion. In *Mechatronics and its Applications (ISMA)*. 10th International Symposium. 2015, December. P. 1-6. IEEE.
2. Yatsun S., Savin S., Yatsun A. Improvement of energy consumption for a lower limb exoskeleton through verticalization time optimization. In *Control and Automation (MED)*. 24th Mediterranean Conference. 2016, June. P. 322-326. IEEE.
3. Yatsun S., Savin S., Yatsun A. Motion Control Algorithm for a Lower Limb Exoskeleton Based on Iterative LQR and ZMP method for trajectory generation. 2016 ITM Web Conference.
4. Yatsun S., Savi S., Yatsun A. Study of controlled motion of an exoskeleton performing obstacle avoidance during a single support walking phase. In *System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*. 20th International Conference. 2016, October. P. 113-118. IEEE.
5. Yatsun S., Savin S., Yatsun A. Comparative analysis of global optimization-based controller tuning methods for an exoskeleton performing push recovery. In *System Theory,*

Control and Computing (ICSTCC). 20th International Conference. 2016, October. P. 107-112. IEEE.

6. Yatsun S., Yatsun A., Savin S., Postolnyi A. Approach to motion control of an exoskeleton in “verticalization-to-walking” regime utilizing pressure sensors. In Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). IEEE International Conference. 2016, June. P. 452-456. IEEE.

7. Yatsun S., Savin S., Lushnikov B., Yatsun A. System analysis of sagittal plane human motion wearing an exoskeleton using marker technology. In ITM Web of Conferences. 2016, January, vol. 6. EDP Sciences.

8. Vorochaeva L.Yu., Yatsun A.S., Yatsun S.F. Controlling a Quasistatic Gait of an Exoskeleton on the basis of the Expert System. St. Petersburg, 2017.

9. Yatsun S., Savin S., Gerasimov M.S. Decision-making system for the lower extremities on the basis of collected neural networks. Progress of vehicles and systems, 2018. P. 198-199.

10. Bolotnik N. N., Zeidis I. M., Zimmerman K., Yatsun S. F. Dynamics of controlled movements of vibration systems // Izv.R.RAN. TISU. 2006. №5. P.1-11.

Поступила в редакцию 13.02.2019

Подписана в печать 21.03.2019

Reference

1. Yatsun S., Savin S., Yatsun A., Turlapov R. Adaptive control system for exoskeleton performing sit-to-stand motion. In Mechatronics and its Applications (ISMA). 10th International Symposium. 2015, December, pp. 1-6. IEEE.

2. Yatsun S., Savin S., Yatsun A. Improvement of energy consumption for a lower limb exoskeleton through verticalization time optimization. In Control and Automation (MED). 24th Mediterranean Conference. 2016, June, pp. 322-326. IEEE.

3. Yatsun S., Savin S., Yatsun A. Motion Control Algorithm for a Lower Limb Exoskeleton Based on Iterative LQR and ZMP method for trajectory generation. 2016 ITM Web Conference.

4. Yatsun S., Savi S., Yatsun A. Study of controlled motion of an exoskeleton performing obstacle avoidance during a single support walking phase. In System Theory, Control and Computing (ICSTCC). 20th International Conference. 2016, October, pp. 113-118. IEEE.

5. Yatsun S., Savin S., Yatsun A. Comparative analysis of global optimization-based controller tuning methods for an exoskeleton performing push recovery. In System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 20th International Conference. 2016. October, pp. 107-112. IEEE.

6. Yatsun S., Yatsun A., Savin S., Postolnyi A. Approach to motion control of an exoskeleton in “verticalization-to-walking” regime utilizing pressure sensors. In Cyber Technol-

ogy in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). IEEE International Conference. 2016, June, pp. 452-456. IEEE.

7. Yatsun S., Savin S., Lushnikov B., Yatsun A. System analysis of sagittal plane human motion wearing an exoskeleton using marker technology. In ITM Web of Conferences. 2016, January, vol. 6. EDP Sciences.

8. Vorochaeva L.Yu., Yatsun A.S., Yatsun S.F. Controlling a Quasistatic Gait of an Exoskeleton on the basis of the Expert System. St. Petersburg, 2017.

9. Yatsun S., Savin S., Gerasimov M.S. Decision-making system for the lower extremities on the basis of collected neural networks. Progress of vehicles and systems, 2018, pp. 198-199.

10. Bolotnik N. N., Zeidis I. M., Zimmerman K., Yatsun S. F. Dynamics of controlled movements of vibration systems. *Izv.R.RAN. TISU*. 2006, no.5, pp.1-11.

Received 13.02.2019

Accepted 21.03.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Сергей Фёдорович Яцун, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Sergey F. Yatsun, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: teormeh@inbox.ru

Владимир Михайлович Антипов, магистрант, кафедра механики, мехатроники и робототехники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vovik_0_1@mail.ru

Vladimir M. Antipov, Master Student, Mechanics, Mechatronics and Robotics Department Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vovik_0_1@mail.ru

Андрей Евгеньевич Карлов, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@mail.ru

Andrey Ye. Karlov, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@mail.ru

Аль Манджи Хамиль Хамед Мохаммед, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@mail.ru

Al Manji Hamil Hamed Mohammed, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@mail.ru

УДК 53.087:620.19

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-18-28

Способы оценки реальных размеров дефектов на основе длин их фронтальных образов

М. Н. Давыдов, А. П. Липатова, Ю. С. Ткаченко ✉

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 394026, Россия, г. Воронеж,
Московский проспект, 14

✉ e-mail: kafedra-ao@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Публикация посвящена пристальному анализу выявления размеров дефектов и способов их определения. Целью является решение задачи рационального выбора оборудования, которое даст возможность в полной мере наглядно и достаточно достоверно судить о качестве изделия. Это важно, поскольку в зависимости от материала изделия, получаемые размеры дефектов могут отличаться.

Методы. Для этого в данной статье рассматривается метод определения реальных размеров образов дефектов при ультразвуковом контроле корпусов магистральных нефтяных насосов из стали марки 20ГЛ с применением дефектоскопа с цифро-фокусированными антенными решетками. Описаны основные отличия при настройке оборудования, использующего различные способы восстановления изображения, и целесообразность применения многоканальных датчиков при контроле деталей данного типа. Рассмотрена конструкция антенной и фазированной решетки, принцип работы датчиков с ФАР и ЦФАР. Проведено исследование литого корпуса магистрального нефтяного насоса, в ходе которого были обнаружены дефекты типа «рыхлота». Определены их максимально допустимые фронтальные протяженности и выведена формула определения их реального размера. Рассмотрена зависимость фронтальных размеров образов дефектов от глубины их залегания в изделии.

Результаты. По полученным данным построен график зависимости фронтального размера образа от глубины залегания. С помощью этого графика можно определить максимально допустимые размеры образов дефектов для промежуточной глубины, исключая расчеты, что подтверждает экономическую эффективность при анализе результатов контроля, используя данный метод.

Заключение. Авторами обоснована целесообразность применения оборудования с ФАР и ЦФАР.

Ключевые слова: детали литые; детали корпусные; контроль неразрушающий; контроль ультразвуковой; решетка антенная.

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

Для цитирования: Давыдов М. Н., Липатова А. П., Ткаченко Ю. С. Способы оценки реальных размеров дефектов на основе длин их фронтальных образов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 18-28. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-18-28.

Methods for Estimating the Actual Size of Defects Based on the Lengths of Their Frontal Images

Maxim N. Davydov, Anastasia P. Lipatova, Yury S. Tkachenko ✉

Voronezh State Technical University, 14 Moskovskiy prospect, Voronezh, 394026, Russian Federation

✉ e-mail: kafedra-ao@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The present paper concerns the close analysis of detecting the sizes of defects and ways of their identification. The aim is to solve the problem of rational choice of equipment, which will make it possible to fully, clearly and reliably judge the quality of the product. This is important because, depending on the material of the product, the resulting defect sizes may vary.

Methods. For this purpose, this article discusses a method for determining the actual size of defects' images in ultrasonic control of export oil pump cases made of 20GL steel grade using a flaw detector with digital-focused antenna arrays. The paper describes the main differences in the configuration of equipment that uses different techniques of image restoration, and the feasibility of applying multi-channel sensors for the control of this type parts. The design of the antenna array and phased antenna array has been considered as well as the principle of operation of sensors with phased array antenna and digital phased array antenna. The study of the cast body of export oil pump has been completed, during which defects such as "microporosity" was found. There have been identified their maximum permissible front distances and the formula to determine their actual size has been deduced. The dependence of frontal sizes of defect images on the depth of their occurrence in the product has been considered.

Results. According to the obtained data, a graph of dependence of the frontal size of a defect image on the depth of occurrence has been constructed. Using this graph, it is possible to determine the maximum permissible sizes of defect images for intermediary depth, excluding calculations, which confirms the economic efficiency in the analysis of the control results using this method.

Conclusion. The authors substantiate the feasibility of using equipment with phased array antenna and digital phased array antenna.

Keywords: cast parts; case-shaped parts; non-destructive control; ultrasonic control; antenna array.

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

For citation: Davydov M. N., Lipatova A. P., Tkachenko Y. S. Methods for Estimating the Actual Size of Defects Based on the Lengths of Their Frontal Images. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(2): 18-28 (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-18-28.

Введение

Новые технологии активно занимают место в нашей жизни. Это коснулось и методов неразрушающего контроля (НК), с помощью которых воз-

можно увеличить срок эксплуатации изделия за счет своевременного устранения дефектов и минимизировать риски экономических потерь, а в ряде случаев избежать аварии, которая может

возникнуть из-за применения изделий ненадлежащего качества. Развитие цифровой электроники позволило расширить возможности некоторых из них.

Одним из этих методов стал ультразвуковой контроль (УК), основанный на применении упругих колебаний и волн в объекте контроля (ОК). Он позволяет получить информацию о дефектах, расположенных как на поверхности изделия, так и на различных глубинах [3]. В настоящее время он активно развивается, и современные приборы включают передовые решения в области микроэлектроники и вычислительной техники. К таким приборам относятся дефектоскопы с применением цифро-фокусированными антенными решетками (ЦФАР) и фазированными антенными решетками (ФАР), которые позволяют визуализировать внутреннюю структуру изделия и производить контроль с изменением угла ввода.

Данные приборы имеют ряд преимуществ, в сравнении с классическими дефектоскопами, что вызывает огромный интерес со стороны специалистов, стремящихся повысить достоверность и надежность контроля, и производителей, целью которых является повышение качества и срока службы выпускаемой продукции.

Целью работы является сравнение работы ультразвуковых дефектоскопов с ФАР и ЦФАР при контроле литых корпусов магистральных нефтяных насосов из стали марки 20ГЛ и определение реальных размеров дефектов.

Материалы и методы решения задачи

Объектом исследования является литой корпус магистрального нефтяного насоса (МНН), изготовленный из стали марки 20ГЛ. Ультразвуковому контролю подвергают радиусные переходы от корпуса к карману сбора утечек нефти – зона А (рис.1).

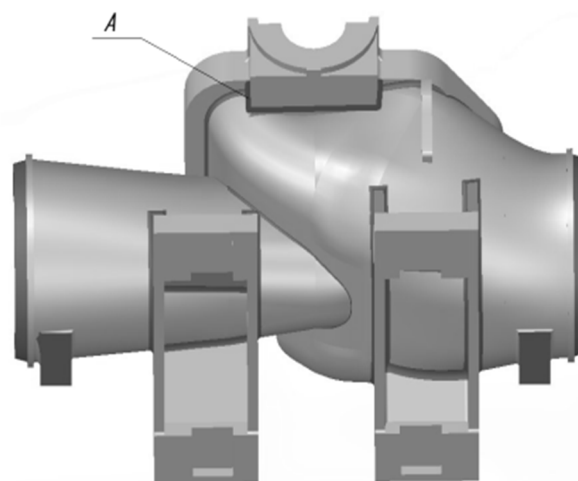


Рис. 1. Литой корпус МНН

Одним из самых распространенных дефектов в изделиях данного типа являются усадочные раковины (рис. 2), рыхлоты (рис. 3) и пористость (рис. 4).



Рис. 2. Усадочная раковина



Рис. 3. Рыхлота

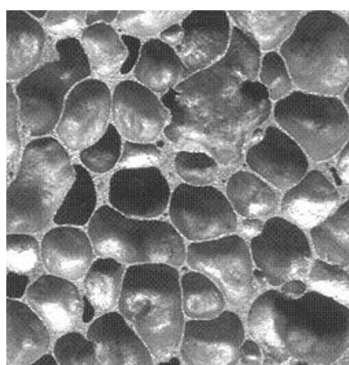


Рис. 4. Пористость

Основные причины их возникновения связаны с неправильным питанием отливки жидким металлом, большой температурой заливки, нарушением характеристик формы для выплавки или самой конструкцией отливки [3].

Испытания проводятся с применением следующего оборудования:

- ультразвуковой дефектоскоп-томограф A1550 IntroVisor (рис. 5);
- ультразвуковой дефектоскоп на фазированных решетках УСД-60ФР (рис. 6).

В отличие от классического УК, который подразумевает наличие одноэлементного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП), данные приборы позволяют работать с многоэлементными датчиками [4].



Рис. 5. Ультразвуковой дефектоскоп A1550 IntroVisor

Несколько источников УЗ волн суммируются и создают суммарный волновой фронт, который может быть задержан во времени так, чтобы получился сфокусированный и управляемый по фазе и амплитуде луч (рис. 7).



Рис. 6. Ультразвуковой дефектоскоп УСД-60ФР

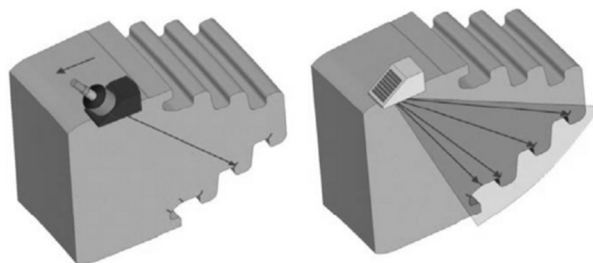


Рис. 7. Одноэлементный ПЭП (слева) и многоэлементный ПЭП (справа)

Основное преимущество и особенность технологии фазированных антенных решеток – это амплитуда и фаза импульсов возбуждения отдельных пьезоэлементов, которая управляется компьютером. Это позволяет изменять угол

ввода луча, фокусное расстояние [5]. Благодаря этому появляется возможность обнаруживать различно ориентированные относительно акустической оси дефекты (рис. 8).

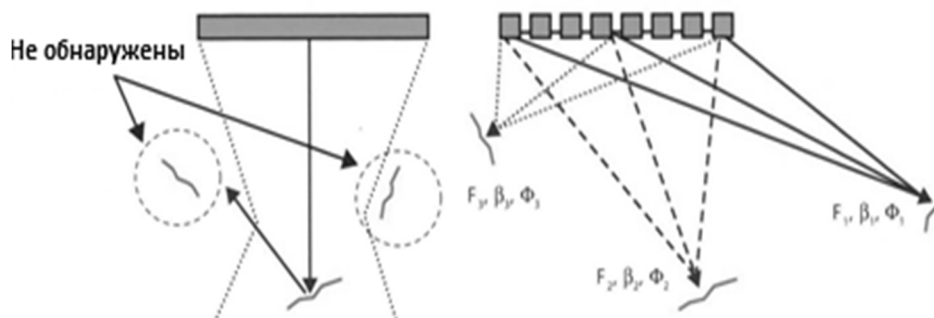


Рис. 8. Обнаружение дефектов одноэлементным ПЭП (слева) и многоэлементным ПЭП (справа)

Данные приборы имеют некоторые различия в способе восстановления изображения. Ультразвуковой дефектоскоп-томограф A1550 IntroVisor регистрирует эхосигналы, излученные и принятые каждым элементом антенной решетки (АР), и далее строит изображение по зарегистрированным эхосигналам. В приборах с ФАР фокусировка происходит путем изменения задержки сигналов возбуждения каждого элемента фазированной решетки (рис 9).

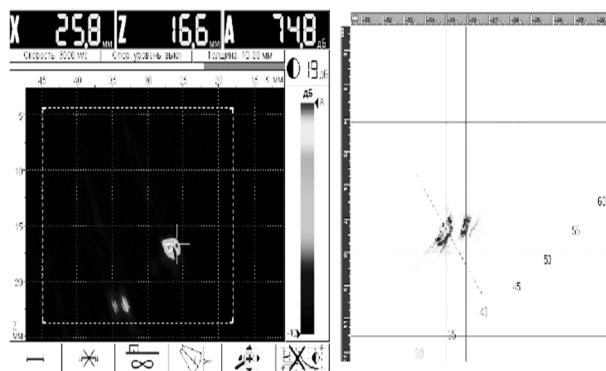


Рис. 9. Сравнение ЦФАР (слева) и ФАР (справа)

В состав A1550 IntroVisor входит электрический блок и антенная решетка (АР) (рис. 10), которая представляет собой набор однотипных пьезоэлементов, расположенных вдоль одной линии на протекторе [6].

УСД-60ФР так же включает электрический блок и ультразвуковой преобразователь с ФАР (рис. 11). Конструкция датчика отличается наличием съемной призмы из рексолита.



Рис. 10. Внешний вид АР



Рис. 11. Ультразвуковой дефектоскоп УСД-60ФР

Настройка оборудования производится с помощью калибровочного образца (стандартный образец предприятия (СОП)). СОП является средством контроля и его изготавливают в соответствии с требованиями ведомственных методических документов на контроль, из материала, имеющего такие

же акустические свойства, что и объект контроля, так же воспроизводят его форму и шероховатость поверхности.

Для контроля МНН применяется СОП №4 (рис. 12) с плоскодонными отверстиями, диаметр которых равен размеру максимально допустимых дефектов в контролируемом изделии в соответствии с нормативно-технической документацией (НТД).

Настройка дефектоскопа производится путем получения образов на экране прибора от всех контрольных отражателей (КО) [7].

Установив датчик УЗ прибора А1550 IntroVisor в положение (1) (рис. 13), на экране получаем изображение (рис. 14). Отчетливо наблюдаются образы от КО 1 и КО 2, расположенные на глубине 10 и 25 мм.

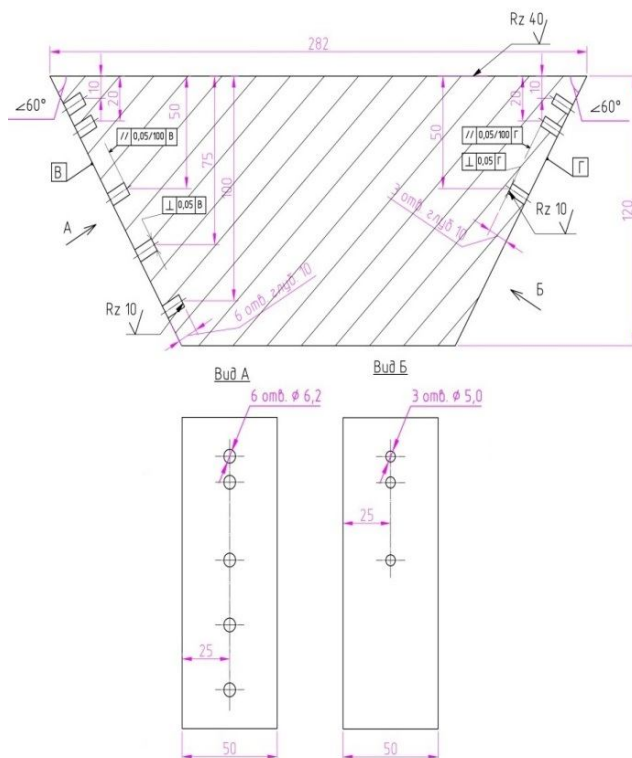


Рис. 12. Стандартный образец предприятия (СОП)

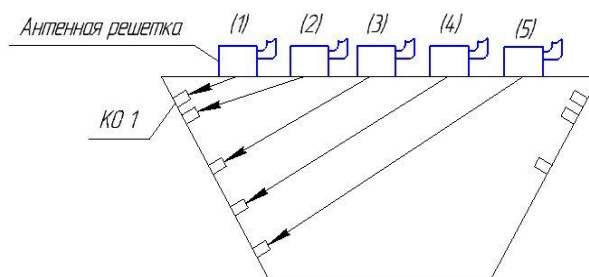


Рис. 13. Положения АР на СОП во время настройки

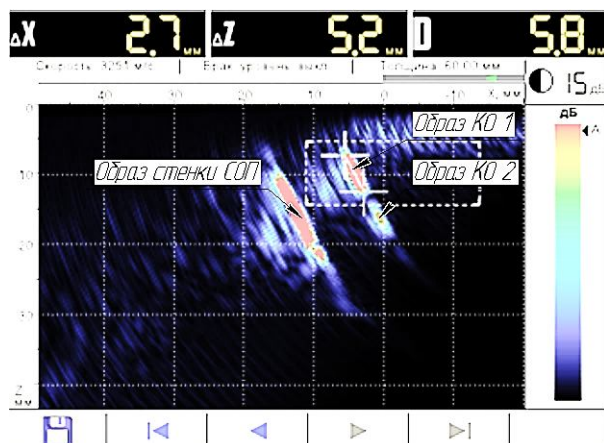


Рис. 14. АР установлена в положение (1)

Линейно перемещая АР по поверхности СОП, в положения (2), (3), (4) и (5) (рис. 13), получаем сигналы от КО 2, КО 3, КО 4 и КО 5, глубины которых: 25, 50, 75 и 100 мм.

С помощью встроенных функций дефектоскопа производится измерение фронтальных размеров образов D, полученных от всех КО [8]:

- $D_1 = 5.8$ мм ну глубине $Z_1 = 10$ мм;
- $D_2 = 6.4$ мм ну глубине $Z_2 = 20$ мм;
- $D_3 = 11.0$ мм ну глубине $Z_3 = 50$ мм;
- $D_4 = 18.9$ мм ну глубине $Z_4 = 75$ мм;
- $D_5 = 22.2$ мм ну глубине $Z_5 = 100$ мм.

Измеренный параметр D – это максимально допустимый фронтальный размер дефекта на различных глубинах.

В результате этих измерений установлена зависимость фронтального раз-

мера образа КО от глубины. Например, отверстие диаметром 6,2 мм на экране прибора на глубине 100 мм видится равным 22,2 мм (рис. 15).

Данная зависимость является линейной. По полученным результатам построен график зависимости фронтального размера от глубины залегания дефекта (рис. 16). Этот график позволяет без математических расчетов определять значения фронтальных размеров для промежуточных глубин залегания дефектов, что во многом экономит время при анализе результатов контроля.

Используя прибор УСД-60ФР предоставляется возможность уйти от понятия «фронтальная протяженность образа», используя встроенную функцию регулировки чувствительности по углу ввода (УРЧ) [9].

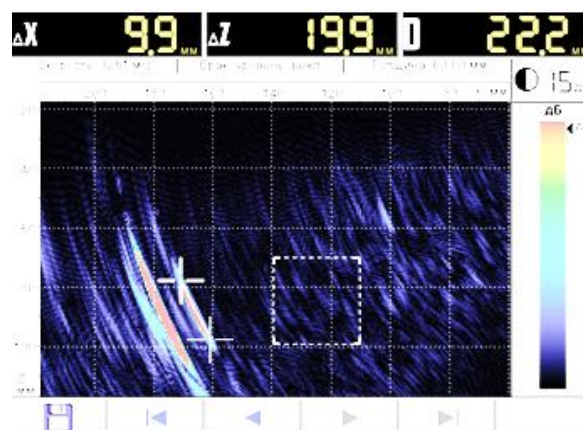


Рис. 15. Образ КО на глубине 100 мм

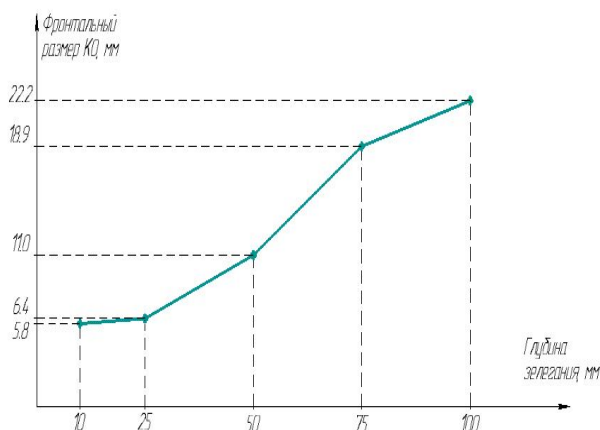


Рис. 16. График зависимости фронтального размера от глубины

Настройка производится по тому же принципу – получением всех сигналов от КО в СОП. Основное различие заключается в том, что производится сравнение амплитуд сигналов от дефектов, а не размеров образов, как на A1550 IntroVisor.

Устанавливаем датчик на СОП и с помощью встроенных функций дефектоскопа устанавливаем точки на полученном образе от КО (рис. 17).

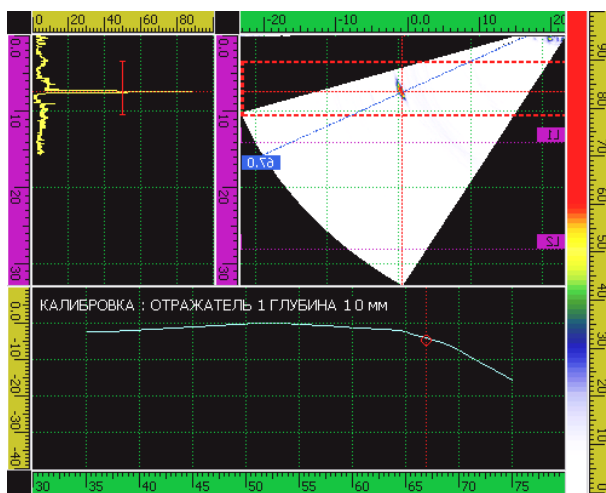


Рис. 17. Образ от КО на экране УСД-60ФР

Прибор запоминает показание усиления в буфере памяти. Сделав эту операцию со всеми КО, производится по-

строение кривой зависимости чувствительности от угла ввода.

В результате этой коррекции размеры от всех КО на различных глубинах будут одинаковыми, что позволяет не производить пересчет размеров фронтальных протяженностей (рис. 18).

Результаты исследований и их обсуждение

При проведении контроля, обнаружив дефект, необходимо определить следующие параметры:

- фронтальная протяженность, мм;
- амплитуда эхосигнала, дБ;
- продольная протяженность, мм;
- координаты от точки начала сканирования.

При возникновении образов на экране прибора требуется прекратить сканирование и найти максимум амплитуды образа, путем перемещения АР. Необходимо убедиться, что полученный образ принадлежит несплошности, а не ложному отражателю, источником которых могут быть сигналы от конструктивных элементов изделия [10].

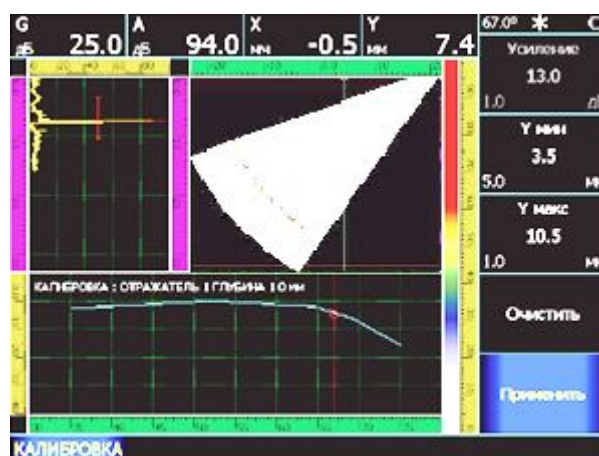


Рис. 18. Образы КО на различных глубинах

На рис. 19 представлен образ от противоположной стенки радиусного перехода. Отличить его от дефекта просто, так как он имеет протяженность по всей конструктивной толщине отливки в данном месте контроля.

На рис. 20 изображен визуальный образ дефекта типа «рыхлота», найденный при помощи A1550 IntroVisor.

Для нахождения реального размера несплошности выведена формула

$$D = \frac{D_{КО}}{D_{max}} * D_x, \quad (1)$$

где $D_{КО}$ – диаметр КО;

D_{MAX} – максимально допустимый фронтальный размер для данной глубины;

D_x – фронтальный размер обнаруженного образа.

$$D = \frac{6.2}{11.0} * 23.7 \approx 13.36 \text{ мм.}$$

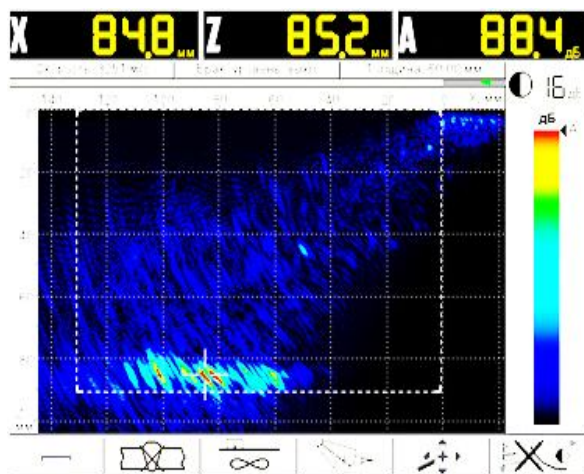


Рис. 19. Образ стенки отливки

Дефект №1 был обнаружен в фрагменте радиусного перехода корпуса магистрального нефтяного насоса. На рис. 21 представлен этот фрагмент с залегающим в нем дефекте типа «рыхлота».

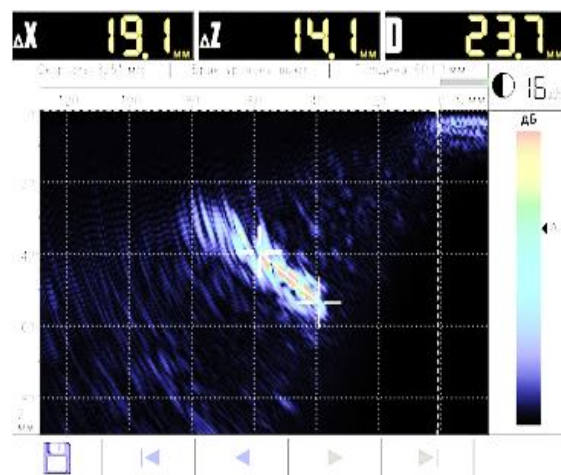


Рис. 20. Дефект №1



Рис. 21. Фрагмент литого корпуса МНН (×5)

Выводы

Ультразвуковой контроль литых корпусных деталей с применением оборудования с ФАР и ЦФАР применять целесообразно, так как появляется возможность наглядно и достаточно достоверно судить о качестве изделия.

Используя A1550 IntroVisor наблюдается зависимость фронтального размера образа дефекта от глубины его залегания в изделии. Составив график зависимости фронтального размера об-

раза от глубины его залегания, упрощается и ускоряется поиск значения допустимого размера для промежуточных глубин.

Использование УСД-60ФР позволяет уйти от пересчета фронтальных

размеров образов, используя функцию регулировки чувствительности по углу ввода (УРЧ), что позволяет сократить время при оценке и анализе результатов контроля.

Список литературы

1. Давыдов М.Н., Ткаченко Ю.С. Особенности выявления различно-ориентированных в пространстве дефектов ультразвуковым методом, с применением антенных решеток // Авиapersпектива: региональный сб. науч. тр. Воронеж, 2017. Вып. 1. С. 148-157.
2. Дефектоскоп ультразвуковой А1550 IntroVisor. Руководство по эксплуатации. М., 2015. 88 с.
3. Зацепин А.Ф. Акустический контроль / под ред. чл.-кор. РАН, проф., д-ра техн. наук В.Е. Щербинина. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 211 с.
4. ГОСТ 19200-80. Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов. М., 1989. 15 с.
5. Бирюков Д.Ю. Преобразователи и методы неразрушающего контроля. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. 179 с.
6. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. 2 изд. М.: Техносфера, 2012. 560 с.
7. Заглянуть в металл. Теперь это просто / В.Г. Шевалдыкин, С.Г. Алехин, А.В. Бишко, А.В. Дурейко, А.А. Клементьев, Н.Ю. Соколов, А.А. Самокрутов // В мире неразрушающего контроля. 2008. № 1 (39). С. 46-53.
8. Методические указания по применению ультразвукового дефектоскопа А1550 IntroVisor с цифро-фокусированными антенными решетками в режиме ТОМОГРАФ. М., 2014. 82 с.
9. НПЦ КРОПУС УСД-60ФР Ультразвуковой дефектоскоп на фазированных решетках. Руководство пользователя. М., 2018. 59 с.
10. Пасси Г.С. Технология фазированных решеток – современная реализация передовых решений в области УЗК, накопленных в прошлом веке // В мире неразрушающего контроля. 2009. № 2 (44). С. 56–64.

Поступила в редакцию 12.03.2019

Подписана в печать 04.04.2019

References

1. Davydov M.N., Tkachenko Ju.S. Osobennosti vyjavlenija razlichno-orientirovannyh v prostranstve defektov ul'trazvukovym metodom, s primeneniem antennyh reshetok. Aviaperspektiva. Regional'nyj sb. nauch. tr. Voronezh, 2017, is. 1, pp. 148-157 (In Russ.).

2. Defektoskop ul'trazvukovoj A1550 IntroVisor. Rukovodstvo po jekspluatacii. Moscow, 2015, 88 p. (In Russ.).
3. Zacepin A.F. Akusticheskij kontrol'; ed. by Shherbinin V.E. Ekaterinburg, 2016, 211 p. (In Russ.).
4. GOST 19200-80. Otlivki iz chuguna i stali. Terminy i opredelenija defektov. Moscow, 1989, 15 p. (In Russ.).
5. Birjukov D.Ju. Preobrazovateli i metody nerazrushajushhego kontrolja. Ekaterinburg, 2008, 179 p. (In Russ.).
6. Hansen R.S. Fazirovannye antennnye reshetki. Moscow, Tehnosfera Publ., 2012, 560 p. (In Russ.).
7. Shevaldykin V.G., Alehin S.G., Bishko A.V., Durejko A.V., Klement'ev A.A., Sokolov N.Ju. Samokrutov A.A. Zagljanut' v metall. Teper' jeto prosto. *V mire nerazrushajushhego kontrolja*, 2008, no. 1 (39), pp. 46-53 (In Russ.).
8. Metodicheskie ukazaniya po primeneniju ul'trazvukovogo defektoskopa A1550 IntroVisor s cifro-fokusirovannymi antennnymi reshetkami v rezhime TOMOGRAF. Moscow, 2014, 82 p. (In Russ.).
9. NPC KROPUS USD-60FR Ul'trazvukovoj defektoskop na fazirovannyh reshetkah. Rukovodstvo pol'zovatelja. Moscow, 2018, 59 p. (In Russ.).
10. Passi G.S. Tehnologija fazirovannyh reshetok – sovremennaja realizacija передовyh reshenij v oblasti UZK, nakoplenyh v proshlom veke. *V mire nerazrushajushhego kontrolja*, 2009, no. 2 (44), pp. 56–64 (In Russ.).

Received 12.03.2019

Accepted 04.04.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Давыдов Максим Николаевич, аспирант,
Воронежский государственный технический
университет, г. Воронеж, Российская
Федерация, e-mail: mountaln@mail.ru,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0586-5244>

Maxim N. Davydov, Post-Graduate Student,
Voronezh State Technical University,
Voronezh, Russian Federation,
e-mail: mountaln@mail.ru,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0586-5244>

Липатова Анастасия Павловна, магистр,
Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж,
Российская Федерация,
e-mail: pavlovnana@mail.ru

Anastasia P. Lipatova, Master's Student,
Voronezh State Technical University,
Voronezh, Russian Federation,
e-mail: pavlovnana@mail.ru «

Ткаченко Юрий Сергеевич, доктор
технических наук, профессор, Воронежский
государственный технический университет,
г. Воронеж, Российская Федерация,
e-mail: kafedra-ao@mail.ru

Yury S. Tkachenko, Doctor of Engineering
Sciences, Professor, Voronezh State Technical
University, Voronezh, Russian Federation,
e-mail: kafedra-ao@mail.ru

УДК 621.7

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-29-52

Влияние режимов высокотемпературной термомеханической обработки на механические свойства арматурного проката

Н. Н. Сергеев ¹, А. Н. Сергеев ¹, С. Н. Кутепов ¹, А. Е. Гвоздев ¹, Е. В. Агеев ² ✉

¹ ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Россия, 300026, Тула, пр. Ленина, 125

² ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Резюме

Упрочняющая термомеханическая обработка (ВТМО), представляющая собой комбинированную технологическую обработку – сочетание пластической деформации и закалки в одном технологическом процессе, с каждым годом находит все более широкое применение в промышленности.

Цель исследования. Изучение влияния режимов ВТМО на формирование механических свойств стального проката, что является весьма актуальной научной проблемой, связанной с получением материалов с заданным комплексом механических характеристик.

Методы. Высокотемпературную термомеханическую обработку (ВТМО) проводили в условиях, при которых процессы рекристаллизации деформированного аустенита частично или полностью подавляются, а процесс полигонизации получает наибольшее развитие с целью формирования развитой субструктуры аустенита, наследуемой мартенситом при последующей закалке.

В работе исследовали изменение свойств высокопрочной арматуры при нагреве (отпуске) с различной интенсивностью. ВТМО осуществляли путем включения закаливающего устройства в технологическую линию стана № 280 ООО «Тулачермет-сталь». Исследования проводили по двум режимам работы стана № 280. В качестве исследуемых сталей были приняты малоуглеродистые арматурные стали Ст3 и Ст5.

Результаты. Экспериментально установлено, что максимальная охлаждающая способность действующего закаливающего устройства проявляется при включении трех рабочих секций с давлением воды около 13-ти в каждой секции. При этом ВТМО следует проводить при максимальной скорости охлаждения в закаливающем устройстве в соответствии с заданным классом упрочнения, т.е. включать наименьшее число рабочих секций. Интенсивный режим охлаждения способствует формированию однородной структуры в упрочняемой арматуре с высоким комплексом механическими. Выявлено, что при проведении ВТМО целесообразно выдерживать температуру деформации в интервале 1000...1050 °С, чтобы гарантировать производство арматуры заданного класса. Показано, что включение закаливающего устройства в линию стана непосредственно за летучими ножницами, а не за чистовой клетью стана приводит не только к безаварийной работе ножниц, но и к увеличению последеформационной выдержки между окончанием деформации и началом закалки прутков до значения, близкого к оптимальному, отвечающему формированию в аустените полигональной субструктуры, наследование которой мартенситом обеспечивает высокие механические свойства стали после ВТМО.

Заключение. Данные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки материалов.

Ключевые слова: арматурная сталь; высокотемпературная термомеханическая обработка; класс прочности; скорость охлаждения.

© Сергеев Н. Н., Сергеев А. Н., Кутепов С. Н., Гвоздев А. Е., Агеев Е. В., 2019

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2019; 23(2): 29-52

Благодарности: Работа выполнена по проекту №11.6682.2017/8.9.

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

Для цитирования: Влияние режимов высокотемпературной термомеханической обработки на механические свойства арматурного проката / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 29-52. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-29-52.

UDC 621.7

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-29-52

Influence of Operating Modes of High-Temperature Thermomechanical Processing on Mechanical Properties of Reinforcing Bars

Nikolay N. Sergeev¹, Aleksandr N. Sergeev¹, Sergey N. Kutepov¹,
Aleksandr E. Gvozdev¹, Evgeniy V. Ageev² ✉

¹ Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy, 125, Lenin ave., Tula, 300026, Russian Federation

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

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Abstract

The strengthening thermomechanical treatment represents the combined processing treatment – a combination of plastic deformation and hardening in one technological process. Year after year, it is more widely applied in industry.

Purpose of research. *The study of strengthening thermomechanical treatment operating modes influence on the formation of mechanical properties of steel, which is a very important scientific problem associated with obtaining materials with a given set of mechanical features.*

Methods. *High-temperature thermomechanical treatment was conducted under the conditions in which the processes of recrystallization of deformed austenite were partially or completely suppressed, and the process of polygonization got the most development, with the goal of forming a developed substructure of austenite inherited by martensite during subsequent quenching.*

The paper investigated the change in the properties of high-strength reinforcement under heating (tempering) with different intensity. High-temperature thermomechanical treatment was carried out by including a hardening device in the technological line of the mill No. 280 LLC "Tulachermet-steel". The studies were carried out on two modes of mill No. 280 operation. Low-carbon reinforcing steels St3 and ST5 were accepted as the studied steels.

Results. *It has been experimentally established that the maximum cooling capacity of the existing hardening device is manifested when three working sections with a water pressure of about 13 in each section are turned on. In this case, high-temperature thermomechanical treatment should be carried out at the maximum cooling rate in the strengthening device in accordance with the specified strength class, i.e., include the least number of working sections. Intensive cooling mode contributes to the formation of a homogeneous structure in the reinforcement with a high mechanical complex. It was found that during high-temperature thermomechanical treatment it is advisable to withstand the deformation temperature in the range of 1000...1050 °C to guarantee the production of reinforcement of a given class. It has been shown that the inclusion of a strengthening device in the mill line directly behind the flying shears, and not behind the finishing stand of the mill leads not only to the trouble-free operation of shears, but also to*

an increase in the post-deformation aging between the end of deformation and the beginning of bar hardening to a value close to the optimal, responsible for the formation of a polygonal substructure in austenite, the inheritance of which by martensite provides high mechanical properties of steel after high-temperature thermomechanical treatment.

Conclusion. *These results can be applied to create resource-saving material treatment processes.*

Keywords: *reinforcing steel; high temperature thermomechanical processing; strength class; cooling rate.*

Acknowledgements: *The work has been done within the project No. 11.6682.2017/8.9.*

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

For citation: Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V. Influence of Operating Modes of High-Temperature Thermomechanical Processing on Mechanical Properties of Reinforcing Bars. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(2): 29-52 (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-29-52.

Введение

Упрочняющая термомеханическая обработка, представляющая собой комбинированную технологическую обработку – сочетание пластической деформации и закалки в одном технологическом процессе, с каждым годом находит все более широкое применение в промышленности. В частности, способом высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) в настоящее время обрабатывают сотни тысяч тонн высокопрочной стержневой арматуры из малоуглеродистых и низколегированных сталей. Улучшение качества полуфабрикатов и изделий из указанных сталей путем упрочняющей термомеханической обработки позволяет экономить 15...30 %, а в ряде случаев до 40...50 % металла в конструкциях и машинах [1].

Упрочняющая обработка стержневой стали с прокатного нагрева по сравнению с термической обработкой ее со специального нагрева снижает капитальные вложения в 4...5 раз, а экс-

плуатационные затраты – в 12 раз [2]. Разработка оптимального технологического режима ВТМО сортового проката непосредственно в потоке прокатного стана позволяет при минимальных затратах значительно улучшить комплекс механических свойств стали и создать условия для массового производства высокопрочного проката.

Цель работы – изучение влияния режимов ВТМО на формирование механических свойств стального проката, что является весьма актуальной научной проблемой, связанной с получением материалов с заданным комплексом механических характеристик.

Материалы и методы исследования

Высокотемпературную термомеханическую обработку (ВТМО) проводили в условиях, при которых процессы рекристаллизации деформированного аустенита частично или полностью подавляются, а процесс полигонизации получает наибольшее развитие с целью формирования развитой субструктуры

аустенита, наследуемой мартенситом при последующей закалке. Это обязывает при выборе технологических факторов ВТМО (температуры, степени и скорости деформации, последеформационной выдержки до закалки) учитывать первостепенную роль процесса полигонизации в образовании аустенита полигонального типа. Только в этом случае может быть обеспечено получение оптимального и более высокого комплекса механических свойств стали, чем комплекс свойств, получаемых в изделии после обычной закалки с отдельного нагрева и последующего отпуска.

В работе исследовали изменение свойств высокопрочной арматуры при нагреве (отпуске) с различной интенсивностью. ВТМО осуществляли путем включения закаливающего устройства в технологическую линию стана № 280 ООО «Тулачермет-сталь». Исследования проводили по двум режимам работы стана № 280. В качестве исследуемых сталей были приняты малоуглеродистые арматурные стали Ст3 и Ст5.

При обработке по режиму № 1 проводили испытания арматурной стали марки Ст5 периодического профиля Ø14 мм, следующего химического состава – 0,33 % С; 0,6 % Мп; 0,042 % Si; 0,025 % S и 0,015 % Р. ВТМО прутков осуществляли путем включения в технологическую линию мелкосортного прокатного стана № 280 закаливающего устройства, которое располагалось на расстоянии 0,5 м от чистовой клетки стана. ВТМО проводили при температуре деформации 1000...1050 °С, степе-

ни деформации около 30 % при скорости прокатки 4,3 м/с.

Скорость охлаждения прутков при закалке варьировали изменением давления воды и температуры (20...25 °С) в секциях закаливающего устройства за счет включения разного числа охлаждающих секций. Первую серию испытаний проводили при работе 3-х секций с давлением воды 17 атм, 4-х секций – 10 атм и 5-ти секций – 8 атм в каждой секции.

Закалку в ходе ВТМО осуществляли по режиму, когда интенсивное охлаждение в закаливающем устройстве прерывалось (сердцевина прутка успевала охладиться до температуры 300...400 °С в зависимости от интенсивности охлаждения) и сменялось последующим замедленным охлаждением прутка на воздухе – по характеру близким к изотермическому – за счет сохранившегося тепла сердцевины (что способствовало протеканию процесса самоотпуска сильно охладившихся поверхностных слоев).

После ВТМО натурные образцы подвергали испытанию на растяжение для определения прочностных и пластических характеристик. При расчете характеристик поперечное сечение определяли путем взвешивания образцов и замера их длины.

Исследования микроструктуры и замеры твердости производили на площадках, полученных путем снятия металла через каждые 1,5 мм от поверхности образца до его сердцевины (всего пять площадок).

При обработке по режиму № 2 закаливающее семи секционное устройство было установлено за летучими ножницами, а не непосредственно после чистовой клетки стана. Таким образом, расстояние от чистовой клетки до закаливающего устройства увеличилось до 6700 мм, и последеформационная пауза (время между окончанием деформации в чистовой клетки и началом охлаждения прутка водой) при скорости прокатки 4,5 м/с составила 1,5 с, в случае отключения первой секции – 2 с, двух секций – 2,6 с и трех секций – 3 с. В этом случае резка прутков 80-ти метровой длины на две части производится в их горячекатанном состоянии, а не закаленном.

Прутки в чистовой клетки стана деформировали по системе овал-круг с обжатием 23...25 %. Температура конца прокатки на стане № 280 колебалась в небольших пределах, в течение смены изменение температуры достигало 40...60 °С (1040...1100 °С), что не отражалось заметно на изменении свойств стали в ходе ВТМО. Максимальный перепад температур по длине 80-метрового прутка не превышал 50...60 °С.

При охлаждении закаливаемых прутков, во всех рабочих секциях закаливающего устройства направление движения воды, подаваемой форсунками, было попутным движению прутка, кроме последней секции, которая работала по принципу противотоков, чтобы избежать выброса воды за пределы закаливающего устройства.

Время охлаждения прутка в закаливающем устройстве колебалось от 2 с

при четырех рабочих секциях до 3,5 с при семи. За это время прутки Ø14 мм охлаждался водой с температурой 25...35 °С со скоростью 300...350 °С/с.

Закалку в ходе ВТМО осуществляли по режиму, когда интенсивное охлаждение в закаливающем устройстве прерывалось (сердцевина прутка успевала охладиться до температуры 300...400 °С в зависимости от интенсивности охлаждения) и сменялось последующим замедленным охлаждением прутка на воздухе – по характеру близким к изотермическому – за счет сохранившегося тепла сердцевины (что способствовало протеканию процесса самоотпуска сильно охладившихся поверхностных слоев).

Упрочнению подвергали малоуглеродистые арматурные стали марок Ст3 и Ст5. Химический состав исследуемых промышленных плавок сталей приведен в таблице 1. После ВТМО натурные образцы подвергали испытаниям на растяжение для определения физико-механических характеристик (пределов прочности и пластических характеристик стали). При расчете характеристик поперечное сечение определяли путем взвешивания образцов и замеров их длины. В ходе ВТМО стан № 280 работал в ритме, близком к нормальному ритму его работы при производстве горячедеформированной стержневой арматуры.

В процессе повторяющихся экспериментов изменяющимися технологическими факторами были: скорость

охлаждения прутков, определяемая сочетанием давления воды в секциях закаливающего устройства и числом рабочих секций; температура деформации

стали в чистовой клети стана и последеформационная пауза, изменяющаяся в зависимости от числа первых нерабочих секций.

Таблица 1

Химический состав промышленных плавок сталей Ст3 и Ст5

№ плавки	Марка стали	Содержание элементов, %		
		C	Mn	Si
Ст5				
1	Ст5пс	0,33	0,76	0,07
2	БСт5пс	0,31	0,48	0,026
3	Ст5пс	0,32	0,76	0,08
4	Ст5пс	0,32	0,60	0,08
5	Ст5пс	0,33	0,74	0,07
6	Ст5пс	0,33	0,60	0,04
7	КСт5пс	0,32	0,75	–
8	БСт5пс	0,28	0,65	–
Ст3				
1	Ст3кс	0,19	0,40	0,07
2	Ст3кс	0,20	0,30	0,07
3	Ст3пс	0,22	0,60	0,07
4	Ст3	0,21	0,45	0,06
5	Ст3	0,20	0,43	0,06

Неизменяющимся технологическим фактором оставалась степень деформации в чистовой клети – 23...25 %. Для данного эксперимента все вышеперечисленные факторы, кроме температуры деформации, выдерживали постоянными.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Исследование влияния ВТМО на механические свойства стали при обработке по режиму № 1

Результаты упрочняющей обработки стали Ст5 способом ВТМО на закаливающем устройстве в зависимости от

скорости охлаждения прутков представлены в таблице 2, из которой видно, что при производстве на опытно-промышленном закаливающем устройстве способом ВТМО прутков Ø14 мм стали марки Ст5 без последующего отпуска можно получить прочностные свойства, отвечающие 3, 4, 5, 6 и даже 7-му классам прочности при сохранении на достаточном уровне показателей пластичности (не ниже 6 %). Упрочнение арматуры из указанной стали обычным способом – закалкой и отпуском – ограничивается получением комплекса свойств не выше 4-го класса.

Таблица 2

Механические свойства стали после ВТМО с разными скоростями охлаждения

№ режима	Режим ВТМО		Расчетные данные				Механические свойства					Класс прочности
	Число секций	Давление воды в секциях, атм	Вес образца, Н	Длина, мм	S_0 , мм ²	Максимальная нагрузка, кг	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$	
1	3	13-13-13	3,49	298	148	20900	1410	1200	6,0	18,0	0,86	AtVII
2	3	9-9-9	3,40	318	140	12500	960	840	8,0	38,0	0,87	AIV
3	3	8-8-8	3,41	274	159	14000	880	720	11,0	42,0	0,82	API

Примечание: средние значения минимум из 5-ти измерений.

Высокопрочная арматурная сталь 5, 6 и 7 классов на прутках Ø14 мм может быть получена при включении в рабочее состояние не менее трех охлаждающих секций с давлением воды свыше 10 атм в каждой.

Термомеханически упрочненная сталь 4-го и более высокого класса имеет отношение условного предела текучести к пределу прочности не ниже 0,86, т. е. значительно выше, чем после обычной закалки. Столь высокое значение этого отношения улучшает эксплуатационные характеристики арматуры в железобетонных конструкциях.

Значения относительного удлинения и сужения отвечают требованиям ГОСТ 10884-94 для высшего 7-го класса упрочняемой стали, и наблюдается эффективное их возрастание по мере снижения уровня ее упрочнения. Изменение твердости по сечению прутка после ВТМО с различными скоростями охлаждения представлено на рисунке 1.

Закаливающая способность исследуемой стали с содержанием углерода 0,33% характеризуется твердостью мартенсита около 50 HRC. Как видно из рисунка 1 (кривые 1–3), твердость поверхностных слоев прутка, обработанного по режиму № 1 наиболее интенсивного охлаждения, достигает лишь 47 HRC. Очевидно, прерванное охлаждение прутка при его закалке способствует сохранению в сердцевине достаточного количества тепла, обеспечивающего самоотпуск на воздухе поверхностных слоев, где уже прошло мартенситное превращение.

Дальнейшие исследования подтвердили, что ВТМО (режим интенсивного охлаждения) сопровождается неравномерным распределением температуры по сечению прутка. Об этом свидетельствует большой перепад по твердости от 47 HRC в поверхностных слоях до 31 HRC в сердцевине и значительное изменение механических свойств (σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ_5).

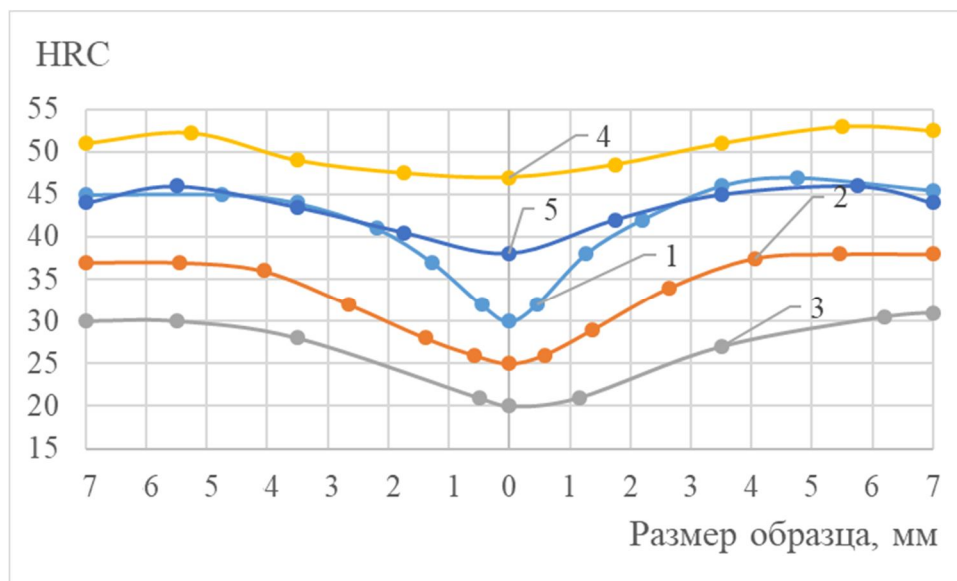


Рис. 1. Изменение твердости по сечению прутка стали Ст5 Ø14 мм: 1, 2, 3 – режимы ВТМО с самоотпуском; 4, 5 – соответственно ВТМО и закалка прутков на закаливающем устройстве до полного охлаждения

Если иметь в виду, что твердость полумартенситной структуры исследуемой стали составляет около 37 HRC, то, следовательно, прутки Ø14 мм в условиях максимального интенсивного охлаждения на закаливающем устройстве не прокалились насквозь.

На рисунке 1 (кривые 4 и 5), для сравнения, показано изменение твердости по сечению прутков (Ст5, $C = 0,33\%$), испытавших ВТМО и закалку на закаливающем устройстве в условиях полного (а не прерванного) охлаждения [3]. Как видно, режим ВТМО с полным охлаждением способствует относительно равномерному распределению твердости по сечению прутка. Разница в твердости поверхностных и сердцевинных слоев после ВТМО составляет 4 HRC. В прутках после обычной закалки эта разница несколько выше и равна 6 HRC. Более плавный ха-

рактер изменения твердости по сечению после ВТМО по сравнению с обычной закалкой может быть связан с повышением прокаливаемости при ВТМО. Указанная закономерность наблюдалась также на исследуемых ранее прутках Ø18...20 мм. Обработка стали способом ВТМО создает тонкую структуру деформированного аустенита, избыточную концентрацию вакансий и плотность дислокаций, образующих с атомами углерода пары, повышающие его устойчивость против распада в области температур перлитного превращения и, следовательно, прокаливаемости.

Более высокая твердость стали после ВТМО по сравнению с твердостью закаленной стали обусловлена наследованием мартенситом тонкой дефектной структуры деформированного аустенита. Такая мартенситная структура после ВТМО отличается более высокими зна-

чениями микронапряжений II рода, плотности дислокаций, более развитой фрагментацией блоков. Изменение тонкой структуры в указанном направлении способствует упрочнению стали и повышению ее твердости. ВТМО прутков по режимам № 2 и 3 с меньшей интенсивностью охлаждения приводит к повышению твердости в поверхностных слоях до значения, не превышающего уровень твердости полумартенситной структуры исследуемой стали. Перепад твердости поверхностных объемов и сердцевины меньше по сравнению с перепадом по режиму № 1 тем в большей степени, чем ниже интенсивность охлаждения. Так, перепад по твердости по режиму № 2 составляет 12, а по режиму № 3 – 10 единиц.

Следовательно, формирование структур закалки при ВТМО с самоотпуском исследуемых прутков Ø14 мм происходит только в условиях максимального интенсивного их охлаждения в закалывающем устройстве – три работающих секции с давлением воды не ниже 10 атм в каждой.

Значительное изменение твердости по сечению и длине прутков свидетельствует о неравномерной скорости охлаждения поверхностных слоев и сердцевины в условиях ВТМО с самоотпуском. Скорость охлаждения по сечению может быть и выше критической. Поэтому при анализе строения исследуемых прутков целесообразно использование термокинетической диаграммы, описывающей влияние скорости охлаждения на структуру и свойства стали.

На рисунке 2 представлена термокинетическая диаграмма стали Ст5, на которой отчетливо выявлены все температурные области превращения аустенита: перлитная, промежуточная (бейнитная) и мартенситная.

На диаграмму нанесены реальные кривые охлаждения пластинок исследуемой стали размером 1,6×120×180 мм в средах: в воде с температурой 18, 50 и 74 °С, трансформаторном масле, соляной ванне (350 °С). Изменение температуры и времени при охлаждении записывали с помощью осциллографа Н-700.

Наложение реальных кривых охлаждения образцов в различных закалывающих средах на диаграмму с указанием для каждой кривой значений твердости позволяет полнее установить механизм и кинетику процессов превращения аустенита в зависимости от скорости охлаждения, а также провести анализ строения и свойств стали.

Микроструктурный анализ по сечению прутка стали Ст5, упрочненной до 7-го класса прочности, показал, что в поверхностных слоях фиксируется мелкоигольчатая структура мартенсита. Замеренная микротвердость этой структуры составляет 520 НV. По данным термокинетической диаграммы подобная структура образуется в области температур мартенситного превращения при скорости охлаждения больше критической. На расстоянии 5,5 мм от поверхности выявлена двухфазная структура: игольчатая с микротвердостью 470 НV и зерна в виде темных выделений.

Электронно-микроскопическим анализом и по результатам замера микротвердости (380...400 HV), установлено, что темные выделения представляют собой структуру трооститного типа. В

соответствии с диаграммой неоднородная микроструктура указанной твердости могла сформироваться в промежуточной области температур распада аустенита.

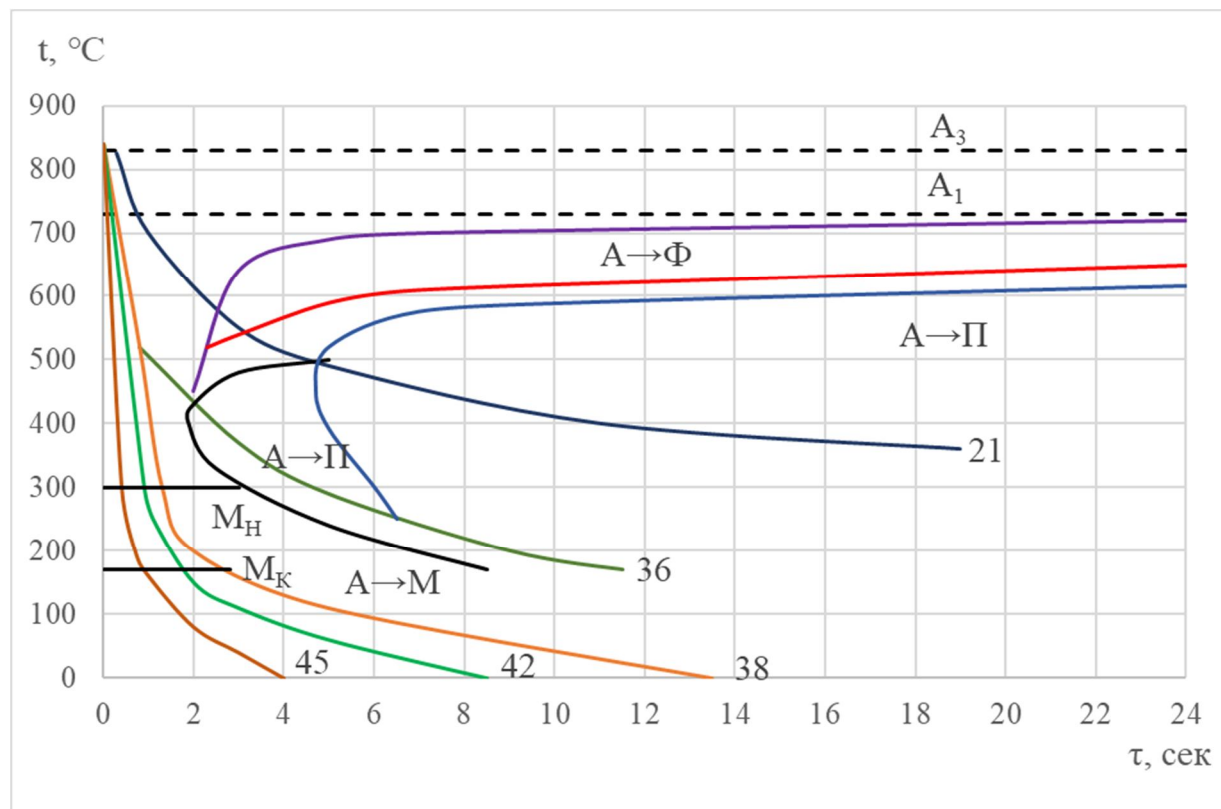


Рис. 2. Термокинетическая диаграмма стали Ст5. Твердость 45 HRC – вода 18 °C; 42 HRC – вода 50 °C; 38 HRC – вода 74 °C; 36 HRC – масло; 21 HRC – соляная ванна 350 °C

Микроструктура в центре прутка внешне сходна с предыдущей с той лишь разницей, что количество тонких выделений увеличилось, а микротвердость понизилась: игольчатой составляющей до 364 HV, темной – 345 HV. Очевидно, образование такой структуры произошло также в промежуточной области распада аустенита, но при более высоких температурах. Таким образом высокопрочным сталям 7-го класса прочности соответствует мартенситно-трооститная дисперсная структура.

Для арматурной стали Ст5 4-го и 3-го классов прочности на поверхности прутка наблюдается игольчатая структура (355 HV), среди которой можно различить небольшие участки светлой фазы (197 HV), представляющей собой пересыщенный упрочненный феррит. В центре прутка отчетливо видны зерна пластинчатого сорбита (197 HV), окруженные светлой ферритной сеткой (98 HV). Такая структура сформировалась в области температур перлитного превращения аустенита.

В результате ВТМО стали Ст5 Ø14 мм на стане № 280 с включением в его технологическую линию закаливающего устройства установлена возможность производства высокопрочной арматурной стали (Ø10...16 мм) различной прочности.

Высокая прочность прутков 5, 6 и 7-го классов прочности после ВТМО обеспечивается формированием в стали дисперсной мартенситно-трооститной структуры.

Охлаждающую способность закаливающего устройства определяли на прутках стали марки Ст5 (Ø18, 20 и 22 мм). ВТМО проводили по режиму: степень деформации в чистовой клети стана около 25 %; температура деформации 1000...1050 °С; скорость охлаждения изменяли варьированием давления воды в секциях и изменением количества секций.

Температуру контролировали перед началом прокатки с помощью фотоэлектрического пирометра; перед чистовой клетью – оптическим пирометром и после ВТМО – термоэлектрическим пирометром.

Механические свойства определяли на натурных образцах длиной 500 мм. Полученные данные представлены в таблице 3. Упрочняющую обработку способом ВТМО прутков Ø18, 20 и 22 мм на стане № 280 с закаливающим устройством можно оценить сравнением со стали в горячекатанном и улучшенном состоянии.

В горячекатанном состоянии арматурная сталь Ст5 отвечает классу прочности А300, а после улучшения как правило обладает механическими свойствами не выше класса прочности А600 (табл. 4).

Из данных, приведенных в таблице 3, видно, что прутки Ø18 мм в зависимости от скорости охлаждения упрочнялись до уровня 3...4 классов. Причем упрочнение до уровня 4-го класса было достигнуто лишь в прутках стали Ст5 с предельно высшим содержанием углерода – 0,37 %. Понижение температуры деформации заметно снижает относительное удлинение.

По выходе из закаливающего устройства прутки имели волнистый вид. Неполная соосность технологической линии стана и закаливающего устройства способствовали тому, что отдельные участки прутка соприкасались со стенками трубы секции и, следовательно, неравномерно охлаждаясь водой. Последствием этого явилось возникновение волнистости прутка и неравномерность механических свойств по его длине, что подтвердили данные испытаний механических свойств (рис. 3).

Упрочнение до уровня 3-го класса достигается включением трех, четырех и пяти секций закаливающего устройства с различными вариантами давления воды в каждой из секций. То есть, увеличение числа работающих секций от трех до пяти не приводило к повышению закаливающей способности, так как при этом снижалось давление воды

в каждой секции. Интенсивность охлаждения больше, а механические свойства выше (в пределах 3-го класса), если включено 3...4 рабочих секций с вы-

соким давлением воды 8...11 атм, чем при работе 5-ти секций с давлением воды 2...5 атм в каждой.

Таблица 3

Режимы ВТМО, химический состав и механические свойства стали
Ст5 после ВТМО при обработке по режиму № 1

№ режима	Диаметр прутка, мм	Содержание элементов, %		Режим ВТМО					Механические свойства					Класс прочности
		C	Mn	Скорость охлаждения		Температура, °С			σ _в , МПа	σ _т , МПа	δ ₅ , %	ψ, %	НВ на поверхности, МПа	
				Число рабочих секций, шт	Давление воды в секция, атм	Перед прокаткой	Перед чистовой клетью	После ВТМО						
1	18	0,37	0,81	3	0-10-9-10-0	1140	1040	350	960	710	10,0	10,0	2900	A600
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	18	0,37	0,81	4	0-11-11-10-11-0	1135	980	370	760	600	13,0	28,0	2300	A400
3	18	0,34	0,82	4	8-10-9-10-0	1135	1000	400	740	620	13,0	33,0	2620	A400
4	18	0,34	0,82	4	8-10-9-10-0	1145	1080	420	810	720	13,0	29,0	2750	A400
5	18	0,34	0,82	4	6-8-7-8-0	1150	970	420	770	560	10,0	29,0	2610	A400
6	18	0,34	0,82	5	5-5-5-5-2	1155	900	500	690	470	12,0	31,0	2460	A400
7	20	0,34	0,78	3	0-11-10-11-0	1135	1040	600	670	460	18,0	52,0	2220	A400
8	20	0,35	0,78	3	0-11-10-11-0	1130	4050	640	630	460	21,0	54,0	2020	A400
9	20	0,35	0,80	4	10-10-9-10-0	1110	1040	340	700	520	16,0	55,0	2350	A400
10	20	0,35	0,80	5	7-7-7-7-1	1120	1030	650	770	570	13,0	47,0	2370	A400
11	22	0,35	0,80	3	0-10-10-10-0	1120	1040	670	670	460	15,0	47,0	2290	A400
12	22	0,35	0,80	4	10-9-9-9-0	1120	1020	680	680	480	16,0	50,0	2180	A400
13	22	0,35	0,80	5	7-6-6-7-1	1120	1060	700	600	400	22,0	52,0	1860	A400
14	22	0,35	0,80	3	0-10-10-10-0	1120	1040	200	690	820	2,0	3,0	5700	A600

Примечание: образец № 14 остановлен в закаливающем устройстве.

Таблица 4

Характеристики механических свойств арматурной стали

Класс прочности	Диаметр стрежня, мм	Механические свойства при растяжении (не менее)			Примечание
		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	
A300	10...40	500	300	19,0	Ст5; 35ГС, 25Г2С; 30ХГ2С – горячекат.
A400	6...40	600	400	14,0	
A600	10...32	900	600	6,0	
A800	10...40	1050	800	9,0	После упрочняющей обработки
A1000	10...40	1200	1000	7,0	
A1200	10...40	1400	1200	6,0	

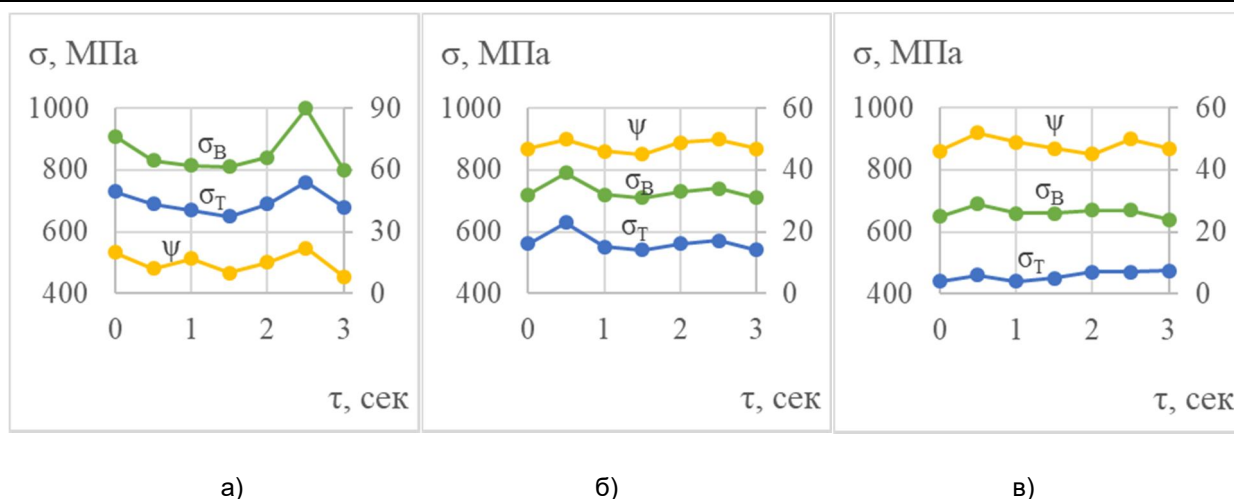


Рис. 3. Изменение механических характеристик стали Ст5 после ВТМО по длине образца: а – Ø18 мм (образец № 1); б – Ø20 мм (образец № 11); в – Ø22 мм (образец № 12)

Прутки Ø20 и 22 мм упрочнялись до уровня 3-го класса. При выходе прутков из закаливающего устройства визуально наблюдался их вишнеый накат, как результат недостаточной охлаждающей способности закаливающего устройства. Ориентировочно температура прутков указанных диаметров после ВТМО составляла свыше 600 °С, тогда как прутки Ø14 мм охлаждались до температуры 370...400 °С.

Прутки, прошедшие ВТМО с полным охлаждением в закаливающем устройстве (остановка прутка после выхода из чистовой клетки стана), при испытании на растяжение разрушались хрупко вследствие образования мартенситной структуры (твердость на поверхности 570 НВ). Разброс механических свойств по длине прутка меньше, чем на прутках Ø14 мм.

Таким образом на основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что повышение охлаждающей способности закаливающего устрой-

ства стана № 280 можно достигнуть двумя способами:

1) увеличением числа охлаждающих секций с одновременным повышением мощности насоса;

2) использованием в работе закаливающего устройства принципа противотока – т. е. создать встречное движение прутка и охлаждающей воды. Второй способ также требует увеличения числа закаливающих секций до количества, определяемого планировкой цеха, однако отпадает необходимость в одновременном повышении мощности насоса.

2.2. Исследование влияния ВТМО на механические свойства стали при обработке по режиму № 2

Влияние скорости охлаждения прутков, температуры деформации стали в чистовой клетки стана и последеформационная пауза на эффективность упрочнения стали и изменение пластических характеристик представлено в таблицах 5 и 6.

Таблица 5

Механические свойства стали Ст5 в зависимости от режима ВТМО
(стержни периодического профиля Ø14 мм)

№ эксперимента	№ плавки	Режим ВТМО			Расчетные данные		Механические свойства					Класс прочности
		$T_{деф}^0$, °C	Пауза, с	Давление воды в секциях, атм	$S_{0,2}$, мм ²	Максимальная нагрузка, кг	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$	δ , % не менее	δ_F , % не менее	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1020	3	0-0-0-11-8-5-4	155	15000	960	—	—	15,0	—	At600
2	2	1100	3	0-0-0-10,5-9-5-4	167	16500	980	—	—	14,0	—	At600
3	2	1030	3	0-0-0-10,5-9-5-4	158	18300	1150	—	—	11,4	3...4,5	At800
4	3	1080	2	0-8-6,5-5-7-4-0-1	156	20250	1320	1200	0,90	7,0	3,0	At1000
5	3	1000	2	0-8-6,5-5-7-4-0-1	163	23800	1460	—	—	5,0	—	At1200
6	4	1010	1,5	11,5-0-12,5-0-7,5-0-1	163	25100	1540	—	—	5,5	—	At1200
7	5	1050	1,35*	0-0-10-10-0,2-0,2-10	158	26150	1660	—	—	5,0	Передний конец 80 м стержня	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
8	5	1000	1,35*	0-0-10-10-0,2-0,2-10	158	27750	1760	—	—	3,5	Задний конец	
9	6	1020	0,02*	9-9-9-0-0	140	12500	960	840	0,87	7,0	—	At600
10	7	1000	0,02*	17-17-0-0-0	—	—	900	780	0,87	7,0	2,0	At600
11	7	1010	0,02*	12-12-12-0-0	—	—	1140	1070	0,93	6,0	2,0	At800
12	8	980	0,02*	13-13-13-0-0	—	—	1260	1130	0,90	5,5	2,0	At1000
13	6	1000	0,02*	13-13-13-0-0	148	20900	1410	1200	0,86	5,0	—	At1200

Примечание: *закаливательное устройство установлено после чистовой клети.

Таблица 6

Механические свойства стали Ст3 в зависимости от режима ВТМО
(стержни периодического профиля Ø14 мм)

№ эксперимента	№ плавки	Режим ВТМО			Расчетные данные		Механические свойства			Класс прочности	Примечание
		$T_{деф}^0$, °C	Пауза, с	Давление воды в секциях, атм	$S_{0,2}$, мм ²	Максимальная нагрузка, кг	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , % не менее		
1	1	990	2,6	0-0-10-10-10-5-45	159	12000	750	—	14,0	At400	—
2	2	1080	2,0	0-9-11-6-6-0-1	148	10300	690	—	17,0	At400	—
3	2	1040	3,0	0-9-11-6-6-0-1	148	13750	940	—	8,5	At600	—
4	3	1000	2,6	0-12-10-6-6-0-1	153	16850	1050	—	7,0	At800	—
5	4	1030	1,35*	0-0-7-7-0,5-0,5-8	153	9500	620	520	12,0	At400	Передний конец
6	4	980	1,35*	0-0-7-7-0,5-0,5-8	153	11000	720	560	12,0	At400	Задний конец
7	4	980	0,02*	12-8-5-5-0	102	10404	1020	860	7,0	At800	Стержень Ø12 мм

Примечание: *закаливательное устройство установлено после чистовой клети.

Данные таблицы 5 свидетельствуют о том, что упрочнение стали до какого-либо уровня можно достигнуть при различных скоростях охлаждения в закаливающем устройстве. Например, прутки стали Ст5 упрочняются до уровня 4 класса включением двух, трех или четырех рабочих секций, давление воды и интенсивность охлаждения в которых уменьшается по мере увеличения их числа (испытания № 1, 3, 9 и 10). Очевидно, что вариант охлаждения с малым числом рабочих секций закаливающего устройства и с высоким давлением воды в каждой из них отвечает наиболее интенсивной закалывающей способности устройства по сравнению с другими возможными вариантами включения числа секций и изменения давления во-

ды. Максимальная охлаждающая способность действующего закалывающего устройства проявляется при включении трех рабочих секций с давлением воды около 13 в каждой секции.

При ВТМО сталей следует выбирать максимальную скорость охлаждения в закаливающем устройстве в соответствии с заданным классом упрочнения, т.е. включать наименьшее число рабочих секций. Интенсивный режим охлаждения способствует образованию однородной структуры в упрочняемой арматуре с высоким комплексом механических свойств, а не из набора различных структурных составляющих как в случае замедленного охлаждения при закалке (рис. 4).

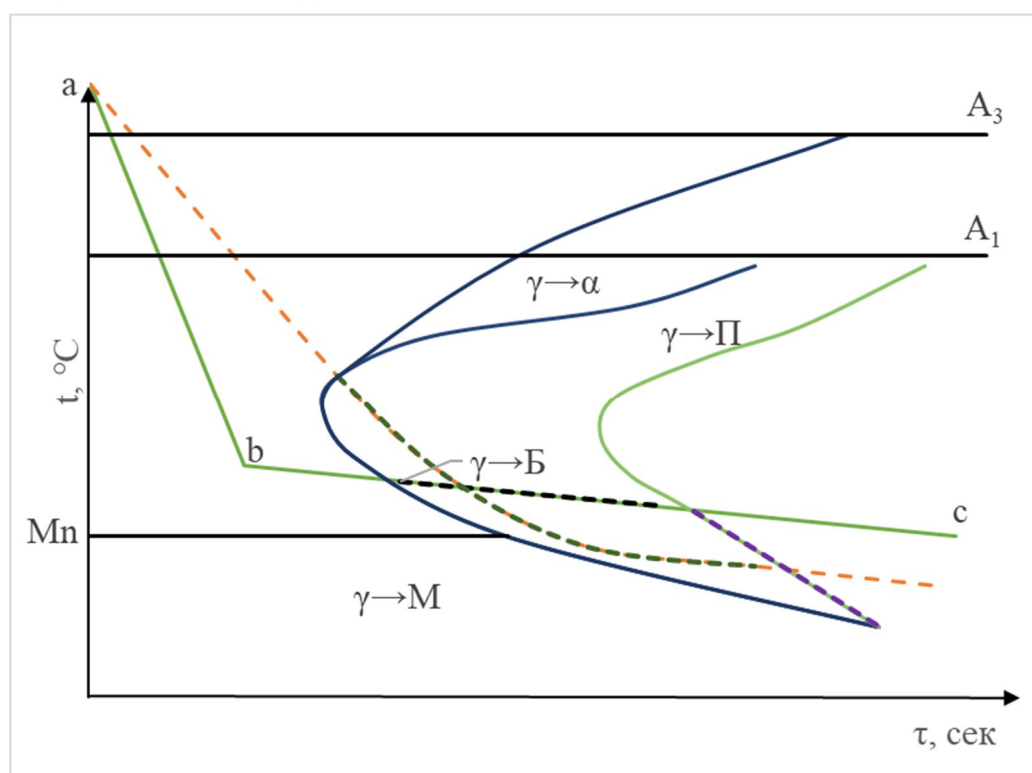


Рис. 4. Термокинетическая диаграмма стали с наложенными на нее кривыми охлаждения:
участок ab – интенсивное охлаждение в закаливающем устройстве; участок
 bc – замедленное охлаждение на воздухе

Прерывая интенсивное охлаждение прутков в закаливающем устройстве, можно обеспечить распад аустенита по всему сечению в нижней температурной области перлитного превращения с образованием структуры троостита (3 и 4 классы упрочнения), в промежуточной области превращения с формированием структуры бейнита (5 и 6 классов), в мартенситной области – структуры отпущенного мартенсита (за счет сохранения тепла сердцевины).

Температура деформации металла в чистовой клети стана влияет на развитие рекристаллизационных процессов в деформированном аустените и, следовательно, на механические свойства упрочняемой стали. Например, изменение температуры с 1000 до 1080 °С приводит к переводу стали из 6-го класса в 7-й, а разница в упрочнении достигает 140 МПа (см. табл. 5 испытания № 4 и 5).

В прутках 80-метровой длины одной заготовки разница по температуре переднего и заднего концов, по нашим данным, составляет 40...50 °С, а по прочности соответственно – около 100 МПа (см. табл. 5 испытания № 7 и 8). Предусмотренный ГОСТом широкий разбег по прочности при переходе от одного класса к другому не выводит в целом прутки за пределы достигаемого класса (см. табл. 6 испытания № 5 и 6).

При проведении ВТМО целесообразно выдерживать температуру деформации в интервале 1000...1050 °С, чтобы гарантировать производство ар-

матуры заданного класса. Обработка сортовой горячекатанной арматуры на стане № 280 проводится при температуре не ниже 1000 °С.

В таблицах 5 и 6 приведены режимы ВТМО, резко отличающиеся продолжительностью последеформационной выдержки (0,02...3,0 с) между окончанием деформации в чистовой клети и началом закалки стержней. Изменение последеформационной выдержки вследствие установки закаливающего устройства в линии стана или непосредственно после чистовой клети, или за летучими ножницами заметно влияет на пластические характеристики упрочненной стали. Например, относительное удлинение стержневой арматурной стали марки Ст5 классов прочности 4, 5 и 6 после ВТМО и последеформационными выдержками 2...3 с равно соответственно 14, 11 и 7 % (см. табл. 62 испытания № 2, 3 и 4), тогда как после паузы продолжительностью 0,02 с относительное удлинение стержней тех же классов прочности снижается до уровня 7, 6 и 5,5 % (см. табл. 5 испытания № 9, 11 и 12). Равномерное относительное удлинение стержней 5-го класса прочности составляет 3...4,5 % при больших паузах и около 2 % – при малых (см. табл. 5 испытания № 3 и 11).

Та же закономерность наблюдается в случае термомеханического упрочнения стали Ст3. Стержни 3-го и 5-го классов, упрочненные с паузой 2,6 с приобретают относительное удлинение

соответственно 14 и 7 %, а с меньшими паузами – 12 и 7 % (см. табл. 6, испытания № 1, 4, 5 и 7).

В зависимости от последеформационных выдержек при ВТМО углеродистых сталей (0,15...0,35% С) характеристики тонкого строения, величина зерна аустенита, а, следовательно, и механические свойства изменяются по сложной зависимости (рис. 5).

Немонотонный характер изменения строения и свойств свидетельствует о том, что пластическая деформация аустенита заканчивается фиксированием в нем стадии горячего наклепа, т.е. нестабильного состояния, которое за время последеформационной выдержки

снижается последовательно проходящими или перекрывающимися друг друга процессами отдыха, полигонизации и рекристаллизации.

При малых выдержках (до 0,1 с) существенно изменяется тонкое строение аустенита: уменьшаются микроискажения II рода, плотность дислокаций, укрупняется субзеренная структура. В результате частично снимается деформационный наклеп, понижаются прочностные свойства и твердость. Указанный характер изменения строения и свойств типичен для процесса отдыха, с которым связан первый этап разупрочнения стали при ВТМО в зависимости от паузы.

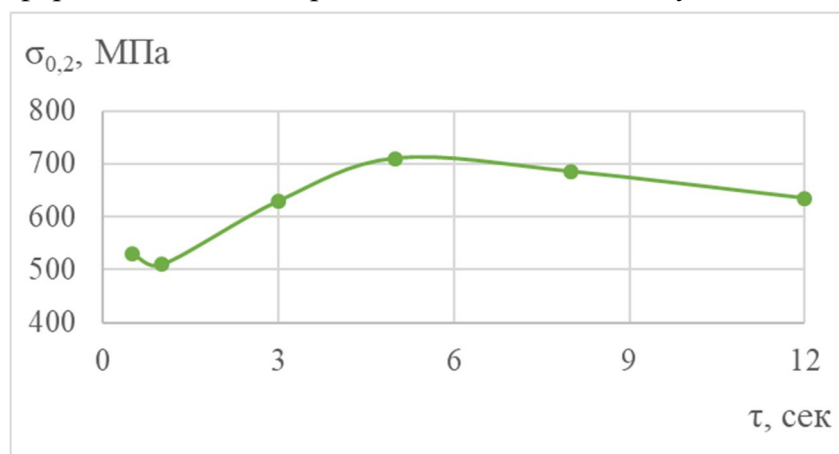


Рис. 5. Изменение условного предела текучести углеродистой стали при ВТМО в зависимости от температуры выдержки

С увеличением последеформационной выдержки (1...5 сек, рис. 5) интенсивно возрастает значение предела текучести достигая максимального значения. Наблюдаемое рентгенографически повышение плотности дислокаций обусловлено их перестройкой в стабильные конфигурации в виде стенок блоков, внутри которых возникает правильная,

близкая к идеальной атомная перестройка. Факт возрастания плотности дислокаций за время паузы, когда происходит их перестройка и частичная аннигиляция, т.е. уменьшение плотности дислокаций, трактуется как признак прошедшего процесса полигонизации [4]. Образование развитой субструктуры в аустените (блоки, разделенные

дислокационными стенками), наследуемой мартенситом, обеспечивает максимальный упрочняющий эффект с одновременным возрастанием пластических характеристик. Выбор паузы, отвечающей формированию полигонального строения аустенита, является основополагающей при разработке режима ВТМО. За время пауз свыше 5 с (рис. 5) получают развитие процессы рекристаллизации, снижающие эффективность ВТМО.

Таким образом, установка закаливающего устройства в линии стана № 280 за летучими ножницами приводит к двум благоприятным последствиям:

- 1) к безаварийной работе ножниц вследствие резки горячекатаных прутков, а не после их охлаждения, повышению стойкости ножей;
- 2) к формированию в стали после ВТМО субструктуры полигонального типа, обладающей одновременно высокой прочностью и пластичностью.

Выводы

1. Установлено, что максимальная охлаждающая способность действующего закаливающего устройства проявляется при включении трех рабочих секций с давлением воды около 13 в каждой секции. При этом ВТМО следу-

ет проводить при максимальной скорости охлаждения в закаливающем устройстве в соответствии с заданным классом упрочнения, т.е. включать наименьшее число рабочих секций. Интенсивный режим охлаждения способствует формированию однородной структуры в упрочняемой арматуре с высоким комплексом механическими.

2. Выявлено, что при проведении ВТМО целесообразно выдерживать температуру деформации в интервале 1000...1050 °С, чтобы гарантировать производство арматуры заданного класса.

3. Показано, что включение закаливающего устройства в линию стана непосредственно за летучими ножницами, а не за чистовой клетью стана приводит не только к безаварийной работе ножниц, но и к увеличению последеформационной выдержки между окончанием деформации и началом закалки прутков до значения, близкого к оптимальному, отвечающему формированию в аустените полигональной субструктуры, наследование которой мартенситом обеспечивает высокие механические свойства стали после ВТМО.

Данные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки материалов [5-22].

Список литературы

1. Основы повышения долговечности высокопрочных сталей, эксплуатируемых в водородсодержащих средах: монография / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, Г. М. Журавлев, А. Е. Гвоздев. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 348 с.

2. Термическое упрочнение проката / К. Ф. Стародубов, И. Г. Узлов, В. Я. Савенков, С. Н. Поляков, Ю. З. Борковский, В. В. Калмыков; под ред. К. Ф. Стародубова. М.: Металлургия, 1970. 368 с.

3. Повышение стойкости термически упрочненного проката против водородного охрупчивания и растрескивания / М. А. Криштал, Б. А. Гусев, Н. Н. Сергеев, Т. А. Минюшина // Физико-химическая механика материалов. 1977. Т. 13. № 6. С. 18-20.

4. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов / пер. с. англ. под ред. Б. Я. Любова. М.: Изд-во «Мир», 1972. 408 с.

5. Влияние микроструктурных факторов и термической обработки на коррозионную стойкость арматурной стали класса А600 / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 2(77). С. 52-63. DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-2-52-63.

6. Влияние технологических режимов упрочнения арматурного проката для композиционных железобетонных конструкций на чувствительность к коррозионно-механическому разрушению / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, О.В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 3. С. 558-568.

7. А. С. № 2018664179 Российская Федерация. Программный комплекс для расчета напряженного и деформированного состояния металлических, порошковых, аморфных, неметаллических, наноструктурных композиционных систем и материалов конструкционного, инструментального и триботехнического назначения в различных условиях / А.Е. Гвоздев, Г.М. Журавлев, И.В. Минаев, А.Н. Сергеев, А.Д. Бреки, Д.В. Малий, М.В. Казаков, С.Н. Кутепов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГПУ им. Л.Н. Толстого». № 2018660758; заявл. 05.10.2018; опубл. 12.11.2018.

8. А. С. № 2018661010 Российская Федерация Программный комплекс расчета мощности сил, определяющих процессы пластического деформирования, поверхностного формоизменения и фрикционного взаимодействия слитковых, порошковых и наноконпозиционных металлических систем / А.Е. Гвоздев, А.Д. Бреки, Ю.С. Дорохин, Г.М. Журавлев, Д.С. Клементьев, С.Н. Кутепов, Д.В. Малий, П.Н. Медведев, И.В. Минаев, А.Н. Сергеев, Д.М. Хонелидзе; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГПУ им. Л. Н. Толстого». № 2018618274; заявл. 31.07.2018; опубл. 30.08.2018.

9. Кинетика распространения трещин в металлических материалах при коррозионно-механическом разрушении / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 1 (26). С. 24-37.

10. Исследование сравнительной стойкости арматурных сталей в процессе ускоренных лабораторных испытаний на водородное растрескивание / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 1 (26). С. 38-48.

11. Влияние уровня растягивающих напряжений на длительную прочность арматурных сталей в водородсодержащих средах / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 2 (27). С. 6-19.

12. Влияние температуры отпуска на стойкость арматурной стали 20ГС2 против водородного растрескивания / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 2 (27). С. 54-67.

13. Взаимодействие дисперсных компонентов смазочного композиционного материала, содержащего наночастицы диоксида вольфрама / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 5. Ч. 2. С. 136-144.

14. Распределение температур и структура в зоне термического влияния для стальных листов после лазерной резки / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, А.Г. Колмаков, И.В. Тихонова, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.М. Хонелидзе, Д.В. Малий, И.В. Голышев // Материаловедение. 2016. № 9. С. 3-7.

15. Технология конструкционных, эксплуатационных и инструментальных материалов / А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Н.Н. Сергеев, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Д. Бреки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 406 с.

16. Жидкие и консистентные смазочные композиционные материалы, содержащие дисперсные частицы гидросиликатов магния, для узлов трения управляемых систем: монография / А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Н.А. Крылов, С.Е. Александров, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Д.В. Малий / под ред. А.Д. Бреки. Тула: Издательство ТулГУ, 2016. 166 с.

17. Разработка прогрессивных технологий получения и обработки металлов, сплавов, порошковых и композиционных наноматериалов: монография / М.Х. Шоршоров, А.Е. Гвоздев, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, А.Д. Бреки, Н.Н. Сергеев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Стариков, Д.В. Малий. Тула: Издательство ТулГУ, 2016. 235 с.

18. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon / A.D. Breki, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 126-129.

19. Роль процесса зародышеобразования в развитии некоторых фазовых переходов первого рода / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, И.В. Тихонова, А.Г. Колмаков // Материаловедение. 2015. № 1. С. 15-21.

20. Влияние деформационной повреждаемости на формирование механических свойств малоуглеродистых сталей / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов // Производство проката. 2015. № 12. С. 9-13.

21. Многоуровневый подход к проблеме замедленного разрушения высокопрочных конструкционных сталей под действием водорода / В.П. Баранов, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Н.Н. Сергеев, А.Н. Чуканов // Материаловедение. 2017. № 7. С. 11-22.

22. Принятие решений по статистическим моделям в управлении качеством продукции / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, С.В. Сапожников, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 5(74). С. 78-92. DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-5-78-92.

Поступила в редакцию 20.02.2019

Подписана в печать 04.03.2019

Reference

1. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Zhuravlev G. M., Gvozdev A. E. Osnovy povysheniya dolgovечnosti vysokoprochnykh stalej, ekspluatiruemyh v vodorod-soderzhashchih sredah. Tula, TulGU Publ., 2019, 348 p. (In Russ.).

2. Starodubov K. F., Uzlov I. G., Savenkov V. YA., Polyakov S. N., Borkovskij YU. Z., Kalmykov V. V. Termicheskoe uprochnenie prokata, ed. by Starodubov K. F. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970, 368 p. (In Russ.).

3. Krishtal M. A., Gusev B. A., Sergeev N. N., Minyushina T. A. Povyshenie stojkosti termicheski uprochnennogo prokata protiv vodorodnogo ohrupchivaniya i rastreskivaniya. *Fiziko-himicheskaya mekhanika materialov*, 1977, vol. 13, no. 6, pp. 18-20 (In Russ.).

4. Honikomb R. Plasticheskaya deformaciya metallov, per. s. angl. ed by Lyubov B. Ya. Moscow, Mir Publ., 1972, 408 p. (In Russ.).

5. Sergeev N.N., Izvol'skij V.V., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V., Klement'ev D.S. Vliyanie mikrostrukturnykh faktorov i termicheskoy obrabotki na korrozionnyu stojkost' armaturnoj stali klassa A600. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 2(77), pp. 52-63. (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-2-52-63.

6. Sergeev N.N., Izvol'skij V.V., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Pantyuhin O.V. Vliyanie tekhnologicheskikh rezhimov uprochneniya armaturnogo prokata dlya kompozitsionnykh zhelezobetonnykh konstrukcij na chuvstvitel'nost' k korrozionno-mekhanicheskomu

razrusheniyu. *Izvestiya Tull'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2019, is. 3, pp. 558-568 (In Russ.).

7. Gvozdev A.E., ZHuravlev G.M., Minaev I.V., Sergeev A.N., Breki A.D., Malij D.V., Kazakov M.V., Kutepov S.N. Programmnyj kompleks dlya rascheta napryazhennogo i deformirovannogo sostoyaniya metallicheskih, poroshkovyh, amorfnyh, nemetallicheskih, nanostrukturnyh kompozicionnyh sistem i materialov konstrukcionnogo, instrumental'nogo i tribotekhnicheskogo naznacheniya v razlichnyh usloviyah. A. S. № 2018664179 Rossijskaya Federaciya; zayavitel' i patentoobladatel' FGBOU VO "TGPU im. L.N. Tolstogo". no. 2018660758; zayavl. 05.10.2018; opubl. 12.11.2018 (In Russ.).

8. Gvozdev A.E., Breki A.D., Dorohin YU.S., ZHuravlev G.M., Klement'ev D.S., Kutepov S.N., Malij D.V., Medvedev P.N., Minaev I.V., Sergeev A.N., Honelidze D.M. Programmnyj kompleks rascheta moshchnosti sil, opredelyayushchih processy plasticheskogo deformirovaniya, poverhnostnogo formoizmeneniya i frikcionnogo vzaimodejstviya slitkovyh, poroshkovyh i nanokompozicionnyh metallicheskih sistem. A. S. № 2018661010 Rossijskaya Federaciya; zayavitel' i patentoobladatel' FGBOU VO «TGPU im. L. N. Tolstogo». № 2018618274; zayavl. 31.07.2018; opubl. 30.08.2018 (In Russ.).

9. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V. Kinetika rasprostraneniya treshchin v metallicheskih materialah pri korrozionno-mekhanicheskom razrushenii. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 8, no. 1 (26), pp. 24-37 (In Russ.).

10. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V., Klement'ev D.S. Issledovanie sravnitel'noj stojkosti armaturnyh stalej v processe uskorenyh laboratornyh ispytaniy na vodorodnoe rastreskivanie. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University*. 2018, vol. 8, no. 1 (26), pp. 38-48 (In Russ.).

11. Sergeev N.N., A Sergeev.N., Gvozdev A.E., Tihonova I.V., Kutepov S.N., Ageev E.V. Vliyanie urovnya rastyagivayushchih napryazhenij na dlitel'nyuyu prochnost'armaturnyh stalej v vodorodsoderzhashchih sredah. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University, Series Engineering and Technologies*. 2018, vol. 8, no. 2 (27), pp. 6-19 (In Russ.).

12. Sergeev N.N., Sergeev A.N., S Kutepov.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V. Vliyanie temperatury otpuska na stojkost' armaturnoj stali 20GS2protiv vodorodnogo rastreskivaniya. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series Engineering and Technologies*, 2018, vol. 8, no. 2 (27), pp. 54-67 (In Russ.).

13. Breki A.D., Tolochko O.V., Vasil'eva E.S., Gvozdev A.E., Starikov N.E. Vzaimodejstvie dispersnyh komponentov smazochnogo kompozicionnogo materiala, soderzhash-

chego nanochasticy dihal'kogenidov vol'frama. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2015, no. 5, pt. 2, pp. 136-144 (In Russ.).

14. Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Minaev V., Kolmakov A.G., Tihonova I.V., Sergeev A.N., Provotorov D.A., Honelidze D.M., Malij V., Golyshev I.V. Raspredelenie temperatur i struktura v zone termicheskogo vliyaniya dlya stal'nykh listov posle lazernoj rezki. *Materialovedenie*, 2016, no. 9, pp. 3-7 (In Russ.).

15. Gvozdev A.E., Starikov N.E., Sergeev N.N., Zolotuhin V.I., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Breki A.D. Tekhnologiya konstrukcionnykh, ekspluatacionnykh i instrumental'nykh materialov. Tula, TulGU Publ., 2018, 406 p. (In Russ.).

16. Breki A.D., Medvedeva V.V., Krylov N.A., Aleksandrov S.E., Gvozdev A.E., Sergeev A.N., Starikov N.E., Provotorov D.A., Sergeev N.N., Malij D.V. ZHidkie i konsistentnye smazochnye kompozicionnye materialy, sodержashchie dispersnye chasticy gidrosilikatov magniya, dlya uzlov treniya upravlyaemykh sistem, ed. by Breki A.D. Tula, TulGU Publ., 2016, 166 p. (In Russ.).

17. SHorshorov M.H., Gvozdev A.E., Zolotuhin V.I., Sergeev A.N., Kalinin A.A., Breki A.D., Sergeev N.N., Kuzovleva O.V., Starikov N.E., Malij D.V. Razrabotka progressivnykh tekhnologiy polucheniya i obrabotki metallov, splavov, poroshkovykh i kompozicionnykh nanomaterialov. Tula, TulGU Publ., 2016, 235 p. (In Russ.).

18. Breki A.D., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Starikov N.E., Provotorov D.A., Sergeyev N.N., Khonelidze D.M. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 126-129 (In Russ.).

19. Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Minaev I.V., Tihonova I.V., Kolmakov A.G. Rol' processa zarodysheobrazovaniya v razvitii nekotorykh fazovykh perekhodov pervogo roda. *Materialovedenie*, 2015, no. 1, pp. 15-21 (In Russ.).

20. ZHuravlev G.M., Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Provotorov D.A. Vliyanie deformatsionnoj povrezhdaemosti na formirovanie mekhanicheskikh svojstv malouglerodistykh stalej. *Proizvodstvo prokata*, 2015, no. 12, pp. 9-13 (In Russ.).

21. Baranov V.P., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Sergeev N.N., CHukanov A.N. Mnogourovnevnyj podhod k probleme zamedlennogo razrusheniya vysokoprochnykh konstrukcionnykh stalej pod dejstviem vodoroda. *Materialovedenie*, 2017, no. 7, pp. 11-22 (In Russ.).

22. ZHuravlev G.M., Gvozdev A.E., Sapozhnikov S.V., Kutepov S.N., Ageev E.V. Prinyatie reshenij po statisticheskim modelyam v upravlenii kachestvom produkcii. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University* 2017, vol. 21, no. 5(74), pp. 78-92. (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-5-78-92.

Received 20.02.2019

Accepted 04.03.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Николай Николаевич Сергеев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии и сервиса» ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», г. Тула, Российская Федерация, e-mail: technology@tspu.tula.ru

Nikolay N. Sergeev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor, Department of Technology and Service Department, Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: technology@tspu.tula.ru

Александр Николаевич Сергеев, доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии и сервиса», ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», г. Тула, Российская Федерация, e-mail: ansergueev@mail.ru

Aleksandr N. Sergeev, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Head of Technology and Service Department, Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: ansergueev@mail.ru

Сергей Николаевич Кутепов, кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Технологии и сервиса», ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», г. Тула, Российская Федерация, e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Sergey N. Kutepov, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Technology and Service Department, Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Александр Евгеньевич Гвоздев, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры «Технологии и сервиса», ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», г. Тула, Российская Федерация, e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Aleksandr E. Gvozdev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief Research Scientist of Technology and Service Department, Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Евгений Викторович Агеев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageev_ev@mail.ru

Evgeniy V. Ageev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor, Professor of Automobile and Vehicle Fleet Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageev_ev@mail.ru

Комплексирование данных системы управления мобильным роботом с использованием расширенного фильтра Калмана

П.А. Безмен ✉

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94

✉ e-mail: pbezmen@yahoo.com

Резюме

Цель исследования. В статье рассматривается адаптация алгоритма расширенного фильтра Калмана для комплексирования данных датчиков физических величин мобильного робота.

Методы. Комплексирование информации – процесс объединения информации (данных) для определения или прогнозирования состояния объекта. Комплексирование обеспечивает повышение робастности управления роботом и точности машинного восприятия информации. Этот процесс схож с многократным проведением эксперимента с целью установить прямым и/или косвенным путями значение некоторой физической величины с требуемой точностью. В системе управления мобильным роботом комплексирование информации датчиков осуществляется одним или несколькими вычислительными устройствами (например, процессорами или микроконтроллерами) [1-5].

Результаты. Успехи в цифровой обработке сигналов и обработке изображений основаны на новых алгоритмах, повышении скорости обработки данных вычислительными устройствами и увеличении скорости доступа к данным, находящимся в хранилищах (запоминающих устройствах) и емкости последних. Вычислительными устройствами также выполняется усреднение и фильтрация сигналов отдельных датчиков и дальнейшее их согласование. Задача рационального объединения и обработки информации от различных измерителей может быть решена с помощью алгоритма фильтра Калмана. Алгоритм линейного фильтра Калмана и, в частности, алгоритм расширенного фильтра Калмана в ходе своей работы выполняют большой объем вычислений. В сравнении с линейным фильтром Калмана, при работе расширенного фильтра Калмана значительно возрастают требования к вычислительной мощности бортового вычислителя (вычислительного устройства, ЭВМ) мобильного робота.

Заключение. Главный эффект от комплексирования заключается в получении принципиально новой информации, которая не может быть получена от отдельных датчиков. Такой подход разгружает каналы передачи информации от больших (избыточных) потоков данных, идущих непосредственно от датчиков, и позволяет снизить требования к вычислительной мощности вычислительного устройства верхнего уровня структуры системы управления мобильным роботом.

Ключевые слова: мобильный робот; комплексирование данных; датчик; робототехника.

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

Для цитирования: Безмен П.А. Комплексирование данных системы управления мобильным роботом с использованием расширенного фильтра Калмана // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 53-64. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-53-64.

UDC 004.896, 621.865

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-53-64

Integration of Mobile Robot Control System Data Using the Extended Kalman Filter

Petr A. Bezmen ✉

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

✉ e-mail: pbezmen@yahoo.com

Abstract

Purpose of research. The article deals with the adaptation of the algorithm of the extended Kalman filter for the integration of data from sensors of physical values of a mobile robot

Methods. Integration of data is the process of information (data) fusion for determination or prediction of the state of an object. Integration provides increased robustness of robot control and accuracy of machine perception of information. This process is similar to repeated experiments in order to determine in direct and/or indirect ways the value of a physical quantity with the required accuracy. In the control system of a mobile robot, the integration of sensor data is carried out by one or more computing devices (for example, processors or microcontrollers) [1-5].

Results. Advances in digital signal processing and image processing are based on new algorithms, increasing the speed of data processing by computing devices and increasing the speed of access to data stored in storage (storage devices) and the capacity of the latter. Computing devices also perform averaging and filtering of signals of individual sensors and their further matching. The problem of sustainable integration and processing of information from different measuring devices can be solved with the help of the Kalman filter algorithm. The Kalman linear filter algorithm and, in particular, the extended Kalman filter algorithm perform a large amount of computation in the course of their work. In comparison with the linear Kalman filter, the extended Kalman filter significantly increases the requirements for the computing power of the onboard computer (computing device, computer) of a mobile robot.

Conclusion. The main effect of integration is to obtain fundamentally new information that cannot be obtained from individual sensors. This approach relieves data channels of large (excessive) data flows coming directly from the sensors, and reduces the requirements for computing power of the computing device of the upper level of the structure of the mobile robot control system.

Keywords: mobile robot, data integration, sensor, robotics.

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

For citation: Bezmen P. A. Integration of mobile robot control system data using the extended Kalman filter. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(2): 53-64 (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-53-64.

Введение

Алгоритм фильтра Калмана (ФК) назван в честь Рудольфа Эмиля Калма-

на, являющегося одним из основных разработчиков теории данного фильтра. Первые работы Р.Э. Калмана, посвященные данному фильтру, появились в

1959-1960 гг. [6]. Фильтр Калмана также называют фильтром Стратоновича-Калмана-Бьюси, т.к. он является частным случаем более общего, нелинейного фильтра, разработанного советским математиком Р.Л. Стратоновичем [7]. В 1960-1961 гг. Р.Э. Калман и Р.С. Бьюси разработали версию фильтра для непрерывного времени [8].

Цифровой ФК представляет собой последовательный рекуррентный алгоритм фильтрации информации дискретных динамических систем, заданных в пространстве состояний. ФК обрабатывает всю информацию, которая может быть предоставлена ему: все доступные измерения, независимо от их точности, для оценки текущего значения интересующих переменных с использованием знаний о динамике системы и измерительных устройств, статистическое описание шумов системы, значения погрешностей измерений, оценки неопределенности состояния системы, любая доступная информация об исходных условиях интересующих переменных. Данный алгоритм объединяет все доступные данные измерений, а также предварительные (предшествующие) знания о системе и измерительных устройствах для получения оценки желаемых переменных таким образом, чтобы ошибка была статистически минимизирована.

Цель работы – адаптация алгоритма расширенного фильтра Калмана для комплексирования данных датчиков физических величин мобильного робота.

Методы решения задачи

1. Алгоритм ФК

Различные реализации ФК, в том числе для нелинейных систем, такой как расширенный фильтр Калмана (РФК, англ. *Extended Kalman filter – EKF*) [9], широко используются в навигационных системах летательных аппаратов, надводных и подводных кораблей, космических аппаратов, ракет, наземных транспортных средств, робототехнике. Из-за требований к высокой вычислительной мощности процессоров и микроконтроллеров бортового оборудования, а также наличию установленного в нем большого объема памяти, длительное время данный рекуррентный фильтр имел малую область применения.

Работу алгоритма ФК можно разделить на 4 стадии:

- 1) инициализация;
- 2) прогнозирование;
- 3) наблюдение;
- 4) оценивание.

Стадии алгоритма 2-4 выполняются циклично и составляют каждый цикл работы фильтра; стадии 3 и 4 можно объединить в этап «корректировка» (рис. 1). На стадии инициализации выполняется присвоение элементам используемых в алгоритме массивов данных (векторов и матриц) нуля и задание начальных значений элементам матрицы ковариаций шума процесса и элементам матрицы ковариаций ошибок измерения. Во второй стадии выполняется прогнозирование состояния неко-

торой системы в следующий момент времени. Третья стадия – получение новой информации (например, данных от датчика). В четвертой стадии новая информация корректирует спрогнозированные значения состояния.

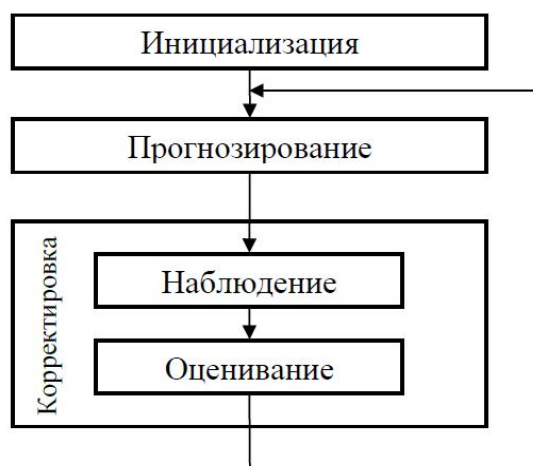


Рис. 1. Стадии работы алгоритма фильтра Калмана

Применение алгоритма ФК в системе управления мобильным роботом позволяет выполнить фильтрацию и комплексирование информации с целью получения скрытых (контекстных) сведений о состоянии системы робота.

Для описания работы ФК введем следующие обозначения.

Текущее общее состояние некоторой системы представим в виде множества значений состояний (например, перемещения, скорости, ускорения) и опишем их в виде вектора x размерностью n :

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix}.$$

Вектор x является результатом работы алгоритма ФК.

Измерения (наблюдения) обозначим в виде вектора z размерностью m :

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_m \end{bmatrix}.$$

Элементы $z_1...z_m$ вектора z являются входными данными (например, данными датчиков физических величин) ФК. При условии, что размерность вектора x меньше размерности вектора z ($n < m$), ФК выполняет комплексирование (объединение) информации.

Модель системы для дискретного времени подразумевает, что состояние системы x в момент времени k (t_k) определяется уравнением состояния:

$$x(k) = F(k)x(k-1) + B(k)u(k-1) + w(k-1), \quad (1)$$

где $F(k)$ – матрица эволюции (процесса изменения состояния) системы от момента времени $k-1$ до момента времени k (применяется к предыдущему состоянию системы, т.е. к $x(k-1)$) – размерность матрицы $n \times n$;

$x(k-1)$ – предыдущее состояние системы;

$B(k)$ – матрица управления (применения управляющего воздействия) (применяется к вектору управляющих воздействий в предыдущий момент времени, т.е. к $u(k-1)$) – размерность матрицы $n \times e$;

$u(k-1)$ – вектор управляющих воздействий размерностью e в предыдущий момент времени;

$w(k-1)$ – вектор шума процесса (случайного процесса) размерностью n , описывающий случайный характер эволюции системы в предыдущий момент времени, имеет многомерное нормальное распределение N и характеризуется нулевым математическим ожиданием (средним значением случайной величины) и ковариационной матрицей $Q(k)$ – матрицей ковариаций шума процесса размерностью $n \times n$: $w(k) \sim N(0, Q(k))$.

Произведение матрицы управления B на вектор управляющих воздействий u в (1) может отсутствовать, если в ФК не учитываются управляющие воздействия на систему.

В момент времени k выполняется наблюдение системы с целью сформировать вектор $z(k)$. Данный вектор выразим в виде уравнения наблюдений:

$$z(k) = H(k)x(k) + v(k), \quad (2)$$

где $H(k)$ – матрица наблюдений системы (применяется к состоянию $x(k)$ системы для отображения пространства состояний в пространство наблюдений) – размерность матрицы $m \times n$;

$x(k)$ – состояние системы в момент времени k ;

$v(k)$ – вектор ошибок измерения (наблюдаемого «белого» гауссовского шума) размерностью m , характеризующегося нулевым математическим ожиданием (средним значением случайной величины) и ковариационной матрицей $R(k)$ – матрицей ковариаций ошибок измерения размерностью $m \times m$: $v(k) \sim N(0, R(k))$.

Предполагается, что вектор шума процесса w и вектор ошибок измерения v независимы друг от друга.

Вектор $\hat{x}(k|k-1)$ априорной (прогнозируемой) оценки состояния системы выразим следующим образом:

$$\hat{x}(k|k-1) = F(k)\hat{x}(k-1|k-1) + B(k)u(k), \quad (3)$$

где $\hat{x}(k-1|k-1)$ – вектор оценки состояния системы в момент времени $(k-1)$ с учетом наблюдений по момент времени $(k-1)$ включительно.

Ковариационную матрицу $P(k|k-1)$ априорной (прогнозируемой) ошибки (ошибки оценки) состояния системы выразим как

$$P(k|k-1) = F(k)P(k-1|k-1)F^T(k) + Q(k), \quad (4)$$

где $P(k-1|k-1)$ – матрица ковариаций ошибки (ошибки оценки) состояния системы в момент времени $(k-1)$ – размерность матрицы $n \times n$;

$Q(k)$ – матрица ковариаций шума процесса.

Вектор $\hat{x}(k|k)$ апостериорной (обновленной) оценки состояния системы выразим следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k|k) &= [1 - G(k)H(k)]\hat{x}(k|k-1) + \\ &+ G(k)z(k) = \hat{x}(k|k-1) + G(k) \times \\ &\times [z(k) - H(k) \cdot \hat{x}(k|k-1)], \end{aligned} \quad (5)$$

где 1 – единичная матрица размерно-

$$\text{стью } n \times n: \mathbf{1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix},$$

$G(k)$ – матрица коэффициентов усиления, оптимальных по Калману – размерность матрицы $n \times m$;

$H(k)$ – матрица наблюдений системы.

Ковариационную матрицу $P(k | k)$ апостериорной (обновленной) ошибки (ошибки оценки) состояния системы выразим как

$$P(k | k) = P(k | k-1) - G(k)S(k)G^T(k), \quad (6)$$

где $S(k)$ – матрица ковариаций отклонений (инноваций) размерностью $m \times m$:

$$S(k) = H(k)P(k | k-1)H^T(k) + R(k). \quad (7)$$

Матрицу $G(k)$ коэффициентов усиления можно представить в виде:

$$G(k) = P(k | k-1)H^T(k)S^{-1}(k), \quad (8)$$

тогда, выполнив подстановку (8) в (6), получим:

$$P(k | k) = P(k | k-1) - [P(k | k-1)H^T(k)S^{-1}(k)]S(k)G^T(k). \quad (9)$$

Т.к. матрица $S(k)$ ковариаций отклонений является невырожденной квадратной, то

$$S^{-1}(k)S(k) = S(k)S^{-1}(k) = \mathbf{1}, \quad (10)$$

где $\mathbf{1}$ – единичная матрица размерностью $m \times m$.

Отсюда имеем:

$$P(k | k) = P(k | k-1) - P(k | k-1)H^T(k)G^T(k). \quad (11)$$

Т.к. ковариационная матрица P ошибки оценки состояния системы является квадратной симметричной, то

$$\begin{aligned} [P(k | k)]^T &= P(k | k), \\ [P(k | k-1)]^T &= P(k | k-1), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} [P(k | k-1) - P(k | k-1)H^T(k)G^T(k)]^T &= \\ = P(k | k-1) - G(k)H(k)P(k | k-1). \end{aligned} \quad (13)$$

Транспонируя левую и правую части выражения (11), имеем:

$$P(k | k) = [\mathbf{1} - G(k)H(k)]P(k | k-1), \quad (14)$$

где $\mathbf{1}$ – единичная матрица размерностью $n \times n$.

Выражение (14) справедливо для оптимального усиления Калмана (8).

Стадия «прогнозирование» работы ФК описывается выражениями (3) и (4), этап «корректировка» – выражениями (5) и (6) (рис. 1).

Вектор некоторого отклонения (инновации) $\tilde{y}(k)$, полученного на шаге k наблюдения системы от наблюдения системы, ожидаемого при произведенном прогнозировании, определим как

$$\tilde{y}(k) = z(k) - H(k)\hat{x}(k | k-1), \quad (15)$$

где $\tilde{y}(k)$ – вектор отклонения (инновации) размерностью m .

Таким образом, вектор апостериорной (обновленной) оценки состояния системы можно выразить как

$$\begin{aligned} \hat{x}(k | k) &= \hat{x}(k | k-1) + \\ &+ G(k)[z(k) - H(k) \cdot \hat{x}(k | k-1)] = \\ &= \hat{x}(k | k-1) + G(k) \cdot \tilde{y}(k). \end{aligned}$$

Отсюда матрицу $S(k)$ ковариаций отклонений (инноваций) можно выразить как

$$S(k) = \text{cov}(\tilde{y}(k)). \quad (16)$$

Матрицу P ковариаций ошибки (ошибки оценки) состояния системы выразим следующим образом:

– для априорной (прогнозируемой) ошибки –

$$P(k | k-1) = \text{cov}(x(k) - \hat{x}(k | k-1)), \quad (17)$$

для апостериорной (обновленной) ошибки –

$$P(k|k) = \text{cov}(x(k) - \hat{x}(k|k)). \quad (18)$$

2. Алгоритм РФК

РФК является субоптимальным алгоритмом фильтрации, применяемым при работе с нелинейными системами [9]. Отличие данного фильтра от линейного фильтра Калмана состоит в возможности принятия нелинейной модели (например, модели движения цели, модели измерений) системы. Алгоритм РФК предполагает линеаризацию нелинейных функций в уравнениях состояния и наблюдений с последующим применением линейного фильтра Калмана.

Для РФК уравнение состояния (1) и уравнение наблюдений (2) принимают вид выражений (19) и (20) соответственно:

$$x(k) = f(x(k-1), u(k-1), (k-1)) + w(k), \quad (19)$$

$$z(k) = h(x(k), k) + v(k). \quad (20)$$

В уравнении состояния (19) и уравнении наблюдений (20) функции $f(\bullet)$ и $h(\bullet)$ – некоторые нелинейные векторные функции, дифференцируемые по вектору состояния x , такие, что:

$$J_{f_x}(k) = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{\hat{x}(k|k-1), u(k-1)}, \quad (21)$$

$$J_{h_x}(k) = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{\hat{x}(k|k-1)}, \quad (22)$$

где $J_{f_x}(k)$ – квадратная матрица Якоби $n \times n$ (n – размерность вектора состояния x) для уравнения состояния в момент времени $(k-1)$ (в предыдущем состоянии системы);

$J_{h_x}(k)$ – прямоугольная матрица Якоби $m \times n$ (m – размерность вектора наблюдений z , n – размерность вектора состояния x) для уравнения наблюдений в момент времени k (в спрогнозированном состоянии системы).

Нелинейная функция процесса (изменения состояния) $f(\bullet)$ используется для прогнозирования состояния (оценки состояния) системы исходя из предыдущего её состояния (оценки состояния).

Нелинейная функция наблюдений $h(\bullet)$ применяется для прогнозирования наблюдений из спрогнозированного состояния (оценки состояния) системы.

Для получения частных производных первого порядка векторных функций $f(\bullet)$ и $h(\bullet)$ размерностями n и m соответственно (с целью линеаризации нелинейных векторных функций $f(\bullet)$ и $h(\bullet)$ и формирования матриц Якоби $J_{f_x}(k)$ и $J_{h_x}(k)$ (21)-(22)) необходимо, чтобы элементы этих функций являлись функциями таких аргументов, что:

$$f(\bullet) = \begin{bmatrix} f_1(x_1, \dots) \\ f_2(\dots, x_2, \dots) \\ \dots \\ f_n(\dots, x_n) \end{bmatrix},$$

$$h(\bullet) = \begin{bmatrix} h_1(x_1, \dots) \\ h_2(\dots, x_2, \dots) \\ \dots \\ h_m(\dots, x_n) \end{bmatrix},$$

где $x_1, \dots, x_n$ – элементы вектора x состояния системы,

$f_1(\bullet), \dots, f_n(\bullet)$ и $h_1(\bullet), \dots, h_m(\bullet)$ – некоторые нелинейные функции одного или нескольких аргументов.

Для алгоритма РФК стадия «прогнозирование» описывается выражениями (23) и (24):

$$\hat{x}(k|k-1) = f(\hat{x}(k-1|k-1), u(k-1), (k-1)), \quad (23)$$

$$P(k|k-1) = J_{f_x}(k)P(k-1|k-1)J_{f_x}^T(k) + Q(k-1), \quad (24)$$

где $J_{f_x}(k)$ и $J_{f_x}^T(k)$ – исходная и транспонированная квадратные матрицы Якоби векторной функции $f(\bullet)$ соответственно.

Этап «корректировка» РФК описывается выражениями (25) и (26):

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + G(k)[z(k) - h(\hat{x}(k|k-1))], \quad (25)$$

$$P(k|k) = [1 - G(k) \cdot J_{h_x}(k)]P(k|k-1), \quad (26)$$

где 1 – единичная матрица размерностью $n \times n$;

$J_{h_x}(k)$ – прямоугольная матрица Якоби векторной функции $h(\bullet)$.

Матрицу $G(k)$ коэффициентов усиления и матрицу $S(k)$ ковариаций отклонений можно представить в виде

$$G(k) = P(k|k-1)J_{h_x}^T(k)S^{-1}(k), \quad (27)$$

$$S(k) = J_{h_x}(k)P(k|k-1)J_{h_x}^T(k) + R(k), \quad (28)$$

где $J_{h_x}(k)$ и $J_{h_x}^T(k)$ – исходная и транспонированная прямоугольные матрицы Якоби векторной функции $h(\bullet)$ соответственно.

Результаты и их обсуждение

Комплексирование данных расширенным фильтром Калмана осуществляется с помощью определенных функций-элементов $h_1(\bullet), \dots, h_m(\bullet)$ векторной функции $h(\bullet)$ при условии, что размер-

ность вектора $x = \hat{x}(k|k)$ (результата цикла работы фильтра) меньше размерности вектора z , например, при $n = 1, n < m, n = \text{const}, m = \text{const}$:

$$h(\bullet) = \begin{bmatrix} h_1(x_1) \\ h_2(x_1) \\ \dots \\ h_m(x_1) \end{bmatrix},$$

т.е. только первый элемент вектора x будет являться аргументом функций $h_1(\bullet), \dots, h_m(\bullet)$. Исходя из данной векторной функции $h(\bullet)$ формируется матрица $J_{h_x}(k)$. Значения элементов векторной функции $h(\bullet)$ и матрицы $J_{h_x}(k)$ вычисляются в начале каждого цикла работы фильтра (см. рис. 1).

Значения элементов матрицы $G(k)$ коэффициентов усиления могут быть использованы как весовые коэффициенты (весы) определенных элементов вектора z с целью придания некоторым элементам данного вектора большего или меньшего веса в значении результата процесса комплексирования по сравнению с другими элементами вектора z . При этом вычисление значений элементов матрицы $G(k)$ согласно выражениям (27) и (28) не выполняется в ходе работы РФК, а вместо этого осуществляется присвоение элементам матрицы $G(k)$ конкретных значений веса в диапазоне $0,0 \dots 1,0$ (с учетом того, что сумма весов всех элементов вектора z , соответствующих конкретному элементу f вектора $\hat{x}$, равна $1,0$). Таким образом, результат процесса комплексирования можно выразить как

$$\hat{x}(k|k)_f = \hat{x}(k|k-1)_f + G(k)_{f,q} [z(k)_q - h(\hat{x}(k|k-1)_f)_q], \quad (29)$$

или, если записать результат процесса комплексирования как результат объединения данных наблюдений $z(k)$, то данный результат является средним арифметическим взвешенным значением,

$$K = \sum_{q=a}^b (G(k)_{f,q} \cdot z(k)_q), \quad (30)$$

где K – результат процесса комплексирования;

$\hat{x}(k|k)_f$ и $\hat{x}(k|k-1)_f$ – некоторые элементы векторов $\hat{x}(k|k)$ и $\hat{x}(k|k-1)$ соответственно, содержащие результат комплексирования;

f – индекс элементов векторов $\hat{x}(k|k)$ и $\hat{x}(k|k-1)$ и матрицы $G(k)$ (индекс строки), $f \in [0, n)$;

q – индекс элементов вектора $z(k)$, матрицы $G(k)$ (индекс столбца), векторной функции $h(\bullet)$, $q \in [a, b]$, $0 \leq a < b < m$, $n < m$, $n = const$, $m = const$, $a = const$, $b = const$.

Каждый цикл работы РФК состоит из последовательного выполнения операций:

1) формирование функции $h(\bullet)$ и матрицы $J_{h,x}(k)$;

2) формирование функции $f(\bullet)$ и матрицы $J_{f,x}(k)$;

3) вычисление матрицы $P(k|k-1)$ согласно выражению (24);

4) вычисление (формирование) матрицы $G(k)$;

5) формирование вектора $z(k)$;

6) вычисление вектора $\hat{x}(k|k)$ согласно выражению (25);

7) вычисление матрицы $P(k|k)$ согласно выражению (26).

Выводы

Алгоритм линейного фильтра Калмана и, в частности, алгоритм РФК в ходе своей работы выполняют большой объем вычислений. В сравнении с линейным фильтром Калмана, при работе РФК значительно возрастают требования к вычислительной мощности бортового вычислителя (вычислительного устройства, ЭВМ) мобильного робота. Значения элементов векторов и матриц, перечисленных в таблице, должны вычисляться на каждом цикле (итерации) работы фильтра – например, в РФК элементы матриц Якоби не являются константами. Увеличение размерностей векторов и матриц влечет за собой возрастание вычислительных затрат работы фильтра. В алгоритме РФК наибольших вычислительных затрат требуют операции умножения и обращения матриц. Вычислительная (временная) асимптотическая сложность одной итерации алгоритма РФК в худшем случае достигает $O(n^3)$, где n – объем обрабатываемых алгоритмом данных [10]. В РФК используется линеаризованная модель реальной нелинейной системы. Для минимизации ошибок работы данного фильтра требуется задание корректных начальных значений элементам векторов и матриц на стадии инициализации.

Размерности векторов и матриц алгоритма ФК

Вектор	Размерность	Матрица	Размерность (строки $\times$ столбцы)
$x(\hat{x})$	n	F	$n \times n$
z	m	H	$m \times n$
$\tilde{y}$	m	B	$n \times e$
u	e	Q	$n \times n$
w	n	R	$m \times m$
v	m	P	$n \times n$
$f(\bullet)$	n	G	$n \times m$
$h(\bullet)$	m	S	$m \times m$
Примечание: $n, m, e \in \mathbb{N}$		J_{f_x}	$n \times n$
		$J_{f_x}^T$	$n \times n$
		J_{h_x}	$m \times n$
		$J_{h_x}^T$	$n \times m$

Особенность фильтров Калмана – предположение, что в системе присутствует влияние гауссовского «белого» шума (характеризующегося нулевым математическим ожиданием) на её состояние, в то время как часто шум имеет более сложную структуру.

Необходимые условия для успешного комплексирования данных:

- адекватные наблюдаемым физическим величинам данные датчиков роботов;
- достаточная частота сбора (обновления) данных датчиков;

– соразмерные (однотипные) данные датчиков;

– достаточная разрешающая способность датчиков;

– высокая надежность датчиков;

– достаточный диапазон (рабочая зона) действия датчиков;

– наличие только постоянной помехи и/или случайных помех, вероятность которых подчиняется закону распределения Гаусса (нормальному закону распределения).

Список литературы

1. Безмен П.А. Архитектура системы управления мобильным роботом // Естественные и технические науки. 2018. №6. С. 100-103.
2. Безмен П.А. Комплексирование данных системы управления мобильным роботом // Естественные и технические науки. 2018. №8. С. 154-157.
3. Безмен П.А. Устройства цифровой обработки сигналов в системах управления мобильными роботами // Актуальные проблемы современной науки. 2018. №4. С. 232-237.

4. Аффа Б., Кападийя, А. DSP или FPGA? Как выбрать нужное устройство // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2008. № 8. С.54-57.
5. Ермолов И.Л. Расширение функциональных возможностей мобильных технологических роботов путем повышения уровня их автономности с использованием иерархической комплексной обработки бортовых данных: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2012. 350 с.
6. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // *Transactions of the ASME (American Society of Mechanical Engineers). Journal of Basic Engineering*. 1960. Vol. 82 (1). P. 35-45.
7. Стратонович Р.Л. К теории оптимальной нелинейной фильтрации случайных функций // *Теория вероятностей и ее применения*. 1959. Т. 4, № 2. С. 239-242.
8. Kalman R.E., Busy, R.S. New Results in Linear Filtering and Prediction Theory // *Transactions of the ASME (American Society of Mechanical Engineers). Journal of Basic Engineering*. 1961. Vol. 83 (1). P. 95-108.
9. Bar-Shalom Y., Li, X.R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software // John Wiley & Sons, 2001. P. 584.
10. Анализ вычислительной сложности рекуррентных алгоритмов обработки данных в оптической когерентной томографии / М.А. Волынский, И.П. Гуров, П.А. Ермолаев, П.С. Скаков // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014. №6. С.35-40.

Поступила в редакцию 11.02.2019

Подписана в печать 06.03.2019

Reference

1. Bezmen P.A. Arkhitektura sistemy upravleniya mobil'nym robotom [The architecture of a mobile robot control system]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Natural and Technical Sciences*, 2018, no. 6, pp. 100-103 (In Russ.).
2. Bezmen P.A. Kompleksirovanie dannykh sistemy upravleniya mobil'nym robotom [Data fusion of a mobile robot control system]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Natural and Technical Sciences*, 2018, no.8, pp. 154-157 (In Russ.).
3. Bezmen P.A. Ustroistva tsifrovoi obrabotki signalov v sistemakh upravleniya mobil'nymi robotami [Digital signal processing devices in mobile robot control systems]. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki = Actual problems of modern science*. 2018, no.4, pp. 232-237 (In Russ.).
4. Afra B., Kapadiya A. DSP ili FPGA? Kak vybrat' nuzhnoe ustroistvo [DSP or FPGA? How to choose the right device]. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: science, technology, business*, 2008, no. 8, pp. 54-57 (In Russ.).

5. Ermolov I.L. Rasshirenie funktsional'nykh vozmozhnostei mobil'nykh tekhnologicheskikh robotov putem povysheniya urovnya ikh avtonomnosti s ispol'zovaniem ierarkhicheskoi kompleksnoi obrabotki bortovykh dannykh [Expansion of functionality of mobile technological robots by increasing their level of autonomy with the use of hierarchical complex processing of onboard data]. Diss. doctor of technical sciences. Moscow, 2012, 350 p. (In Russ.)
6. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transactions of the ASME (American Society of Mechanical Engineers), Journal of Basic Engineering*, 1960, vol. 82 (1), pp. 35-45.
7. Stratonovich R.L. K teorii optimal'noi nelineinoi fil'tratsii sluchainykh funktsii = [On the theory of optimal nonlinear filtering of random functions]. *Teoriya veroyatnostei i ee primeneniya = Probability theory and its applications*, 1959, vol. 4, no. 2, pp. 239-242 (In Russ.).
8. Kalman R.E., Busy, R.S. New Results in Linear Filtering and Prediction Theory. *Transactions of the ASME (American Society of Mechanical Engineers), Journal of Basic Engineering*, 1961, vol. 83 (1), pp. 95-108.
9. Bar-Shalom Y., Li, X.R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software. John Wiley & Sons, 2001, pp. 584.
10. Volynskiy M.A., Gurov I.P., Yermolaev P.A., Skakov P.S. Analiz vychislitel'noi slozhnosti rekurrentnykh algoritmov obrabotki dannykh v opticheskoi kogerentnoi tomografii [Analysis of the computational complexity of recurrent data processing algorithms in optical coherent tomography]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki = Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 6, pp. 35-40 (In Russ.).

Received 11.02.2019

Accepted 06.03.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Пётр Анатольевич Безмен, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: pbezmen@yahoo.com

Petr A. Bezmen, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: pbezmen@yahoo.com

УДК 621.762

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-65-73

Исследование пористости спеченных образцов электроэрозионной порошковой меди

Е. В. Агеева ✉, О. Г. Локтионова, В. В. Куц, Н. М. Хорьякова

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Резюме

Введение. Порошковая медь нашла широкое применение в различных областях машиностроения для производства электроконтактных и антифрикционных изделий. Качество спеченных изделий оценивается по плотности и пористости. Одним из основных методов определения пористости сформованных и спеченных изделий является металлографический метод с элементами качественного и количественного анализов геометрии пор.

Свойства спеченных изделий из электроэрозионной порошковой меди до настоящего времени практически не изучены, что не позволяет прогнозировать их свойства и область практического применения.

Целью работы является исследование пористости и распределения пор по размеру спеченных образцов электроэрозионной порошковой меди.

Методы. Для выполнения намеченных исследований использовали отходы электротехнической медной проволоки (ГОСТ 859-2001). В качестве рабочей жидкости – дистиллированную воду. Для получения порошковой меди использовали установку для получения порошков из токопроводящих материалов (патент на изобретение РФ № 2449859). Параметры диспергирования: напряжение 220 В, емкость 45,5 мкФ, частота следования импульсов 100 Гц.

Изостатическое прессование электроэрозионной порошковой меди, полученной в воде, проводили в гидростате «EPSI» CIP 400-200*1000Y. Скомпактированные образцы спекали в высокотемпературной печи «Nabertherm» VHT 8/22 в вакууме при температуре 900 °С и 1000 °С в течение 1 часа.

Пористость спеченных образцов электроэрозионной порошковой меди, полученной в воде, определяли металлографическим методом с помощью оптического инвертированного микроскопа OLYMPUS GX51.

Результаты. По результатам проведенных исследований экспериментально установлено, что пористость спеченного при 900 °С образца электроэрозионной порошковой меди равна 5,8 %, пористость спеченного при 1000 °С образца электроэрозионной порошковой меди равна 2,16 %.

Заключение. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки металлических сплавов и композиционных материалов.

Ключевые слова: медные отходы; электроэрозионное диспергирование; порошок меди; спекание; пористость спеченных образцов.

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

Для цитирования: Исследование пористости спеченных образцов электроэрозионной порошковой меди / Е. В. Агеева, О. Г. Локтионова, В. В. Куц, Н. М. Хорьякова // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 1. С. 65-73. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-65-73.

Study of Porosity of Sintered Samples of Electroerosive Powder Copper

Yekaterina V. Ageeva ✉, Oksana G. Loktionova, Vadim V. Kuts,
Natalya M. Khorkova

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

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. Powder copper is widely used in various fields of machine engineering for the production of electrical contact and antifriction products. The quality of sintered products is estimated by density and porosity. One of the main methods for determining the porosity of formed and sintered products is a metallographic method with elements of qualitative and quantitative analysis of pore geometry.

The properties of sintered products made of electroerosive copper powder have not been studied up to the present, which makes it impossible to predict their properties and scope of practical application.

The purpose of the work is to study porosity and pore-size distribution of sintered samples of electroerosive copper powder.

Methods. To perform the planned studies, waste of electrical copper wire (GOST 859-2001) was used. As a working fluid distilled water was used. To obtain a powder of copper a unit to produce powders of conductive materials (patent for invention RF № 2449859) was applied. Dispersion parameters were: voltage 220 V, capacity 45.5 μ F, pulse repetition rate 100 Hz.

Isostatic pressing of electroerosive copper powder obtained in water was carried out in isostatic press "EPSI" CIP 400-200*1000Y. The compacted samples were sintered in a high-temperature furnace "Nabertherm" VHT 8/22 in vacuum at a temperature of 900 °C and 1000 °C for 1 hour.

The porosity of the sintered samples of electroerosive copper powder obtained in the water was determined by metallography using optical inverted microscope OLYMPUS GX51.

Results. Based on the results of the conducted studies, it was experimentally proved that the porosity of a sintered sample of electroerosive copper powder at 900 °C is 5.8 %, the porosity of a sintered sample of electroerosive copper powder at 1000 °C is 2.16 %.

Conclusion. The obtained experimental data can be used to create resource-saving processes for processing metal alloys and composite materials.

Keywords: copper waste; electroerosion dispersion; copper powder; sintering; porosity of sintered samples.

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

For citation: Ageeva Y. V., Loktionova O. G., Kuts V. V., Khorkova N. M. Study of Porosity of Sintered Samples of Electroerosive Powder Copper. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019; 23(2): 65-73 (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-65-73.

Введение

Порошковая медь нашла широкое применение в различных областях ма-

шиностроения для производства электроразрывных и антифрикционных из-

делий. Технологический процесс изготовления спеченных изделий начинается с порошковой меди, от метода получения которой зависят величина и форма частиц, насыпная плотность, химический состав, прессуемость, спекаемость [1].

ЭЭД – энергоэффективный процесс, позволяющий получить порошковую медь из отходов, без использования химических реагентов и загрязнения рабочей жидкости и окружающей среды химическими веществами. Свойства образующихся в процессе электроэрозионного диспергирования частиц порошковой меди недостаточно освещены, что не позволяет прогнозировать их гранулометрический, химический, фазовый составы и состояние поверхности [2-16].

Целью работы является исследование пористости и распределения пор по размеру спеченных образцов электроэрозионной порошковой меди.

Материалы и методы решения задачи

Для выполнения намеченных исследований использовали отходы электротехнической медной проволоки (ГОСТ 859-2001). В качестве рабочей жидкости – дистиллированную воду. Для получения порошковой меди использовали установку для получения порошков из токопроводящих материалов (патент на изобретение РФ № 2449859) [17]. Параметры диспергирования: напряжение 220 В, емкость 45,5 мкФ, частота следования импульсов 100 Гц.

Изостатическое прессование электроэрозионной порошковой меди, по-

лученной в воде, проводили в гидростате «EPSI» СІР 400-200*1000У. Скомпактированные образцы спекали в высокотемпературной печи «Nabertherm» VHT 8/22 в вакууме при температуре 900 °С и 1000 °С в течение 1 часа.

Пористость спеченных образцов электроэрозионной порошковой меди, полученной в воде, определяли металлографическим методом с помощью оптического инвертированного микроскопа OLYMPUS GX51.

Методика исследования пористости

Подготовленные образцы не имели следов шлифования, полирования или выкрашивания структурных составляющих. Шлиф изготавливали по поперечному сечению (излому) целого изделия или части его площадью $< 2 \text{ см}^2$. ПО “SIAMS Photolab”, которым оснащен микроскоп, разработано с учётом специфики применения методов цифровой микроскопии и анализа изображений для металлографического анализа соединений. Цифровое изображение материала в оттенках серого выглядит как набор объектов, обладающих близкими цветовыми, яркостными и морфометрическими признаками. Соответственно, автоматическое выделение измерительной информации связано с неизбежным захватом шумов и помех. Для того чтобы обеспечить достоверность результатов анализа, ПО обладает элементами экспертной системы: в интерактивном режиме оператору предлагается выбрать те из автоматически выделенных

объектов, которые, по его мнению, представляют собой дефекты микроструктуры. Поскольку на контролируемой поверхности могут быть обнаружены как отдельные поры, так и цепочки пор, а также микротрещины, то оператор непрерывным маркером обозначает цепочки пор, а одиночные поры ползучести, и микротрещины обозначает маркером как отдельные участки. Результаты маркирования используются для формирования экспертного заключения и расчёта количественных характеристик микроповреждённости. По результатам накопленной статистики в

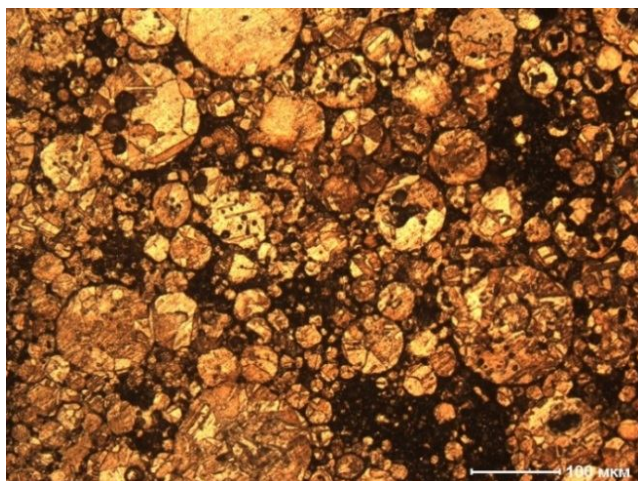
автоматическом режиме создаётся отчёт, который содержит расчётные данные и сведения о контролируемом участке.

Результаты и их обсуждение

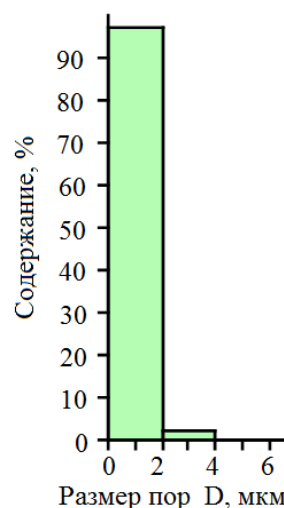
Результаты экспериментальных исследований пористости спеченных при 900 °С и 1000 °С образцов электроэрозионной порошковой меди, полученной в воде, определенной металлографическим методом с помощью инвертированного оптического микроскопа OLYMPUS GX51, приведены на рисунках 1-2 и в таблице.

Пористость спеченных образцов электроэрозионной порошковой меди

Т _{спек} , °С	Площадь, мкм ²	Пористость, %	D _{min} , мкм	D _{max} , мкм	D _{med} , мкм
900	510075,6	5,8	0,1	6,0	2,1
1000	499722,4	2,16	0,2	4,3	0,6

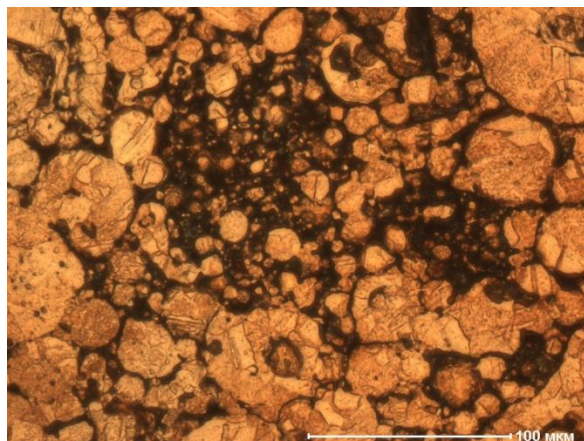


а) Микроструктура (x200)

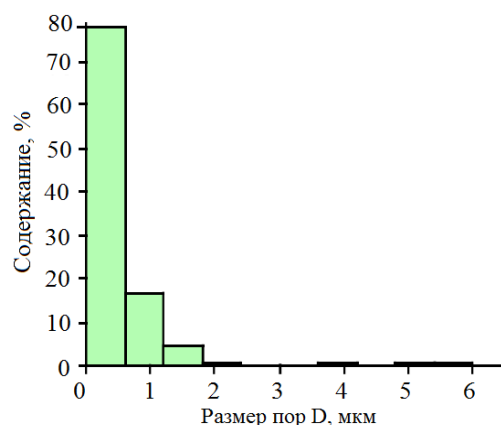


б) Гистограмма распределения пор по размеру (мкм)

Рис. 1. Микроструктура и гистограмма распределения пор по размеру спеченного при 1000 °С образца электроэрозионной порошковой меди



а) Микроструктура (x500)



б) Гистограмма распределения пор по размеру (мкм)

Рис. 2. Микроструктура и гистограмма распределения пор по размеру спеченного при 900 °С образца электроэрозионной порошковой меди

Выводы

По результатам проведенных исследований экспериментально установлено, что пористость спеченного при 900 °С образца электроэрозионной порошковой меди равна 5,8 %, пористость спеченного при 1000 °С образца электроэрозионной порошковой меди равна

2,16 %, что соответствует третьей группе пористости для обоих образцов. Исходя из полученных гистограмм, установлено, что спеченный при 1000 °С образец имеет более узкое распределение пор по размеру и меньший размер пор, по сравнению с образцом, спеченным при 900 °С.

Список литературы

1. Анциферов В.Н. Перспективные порошковые материалы. Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2012. 117 с.
2. Агеев Е.В., Хорьякова Н.М. Повышение срока службы поршневых колец ДВС медными электроэрозионными порошками // Труды ГОСНИТИ. 2017. № 126. С.137-143.
3. Пат. 2599476 Российская Федерация, МПК51 В 22 F 9/14, С 22 В 7/00, В 82 В 3/00. Способ получения медного порошка из отходов / Агеев Е.В., Хорьякова Н.М., Гвоздев А.Е., Агеева Е.В.; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. № 2014135563/13; заяв. 02.09.14; опубл. 10.10.16, Бюл. № 28. 5 с.: ил.
4. Пат. 2597445 Российская Федерация, МПК51 В 22 F 9/14, С 22 В 7/00, С 22 В 15/00, В 82 Y 30/00. Способ получения нанопорошка меди из отходов / Агеев Е.В., Хорьякова Н.М., Гвоздев А.Е., Агеева Е.В., Малюхов В.С.; заявитель и патентообладатель Юго-Западный гос. ун-т. № 2014135563/13; заяв. 02.09.14; опубл. 10.10.16, Бюл. № 28. 5 с.: ил.

тель Юго-Западный гос. ун-т. № 2014135539/02; заяв. 02.09.14; опубл. 10.09.16, Бюл. № 25. 4 с.: ил.

5. Хорьякова Н.М., Малюхов В.С. Применение медных порошков и зависимость их свойств от размеров частиц // Перспективное развитие науки, техники и технологии: сб. докладов III-й Междунар. науч.-практич. конф.: в 3 т. Курск, 2013. Т. 3. С. 258-362.

6. Агеева Е.В., Хорьякова Н.М., Агеев Е.В. Исследование формы и морфологии электроэрозионных медных порошков, полученных из отходов // Вестник машиностроения. 2014. № 8. С. 73-75.

7. Агеева Е.В., Хорьякова Н.М., Агеев Е.В. Исследование распределения микрочастиц по размерам в порошках, полученных электроэрозионным диспергированием медных отходов // Вестник машиностроения. 2014. № 9. С. 63-65.

8. Рентгеноструктурный анализ порошка, полученного электроэрозионным диспергированием в среде керосина / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, Р.А. Латыпов, П.И. Бурак // Международный технико-экономический журнал. 2015. № 2. С 59-65.

9. Агеев Е.В., Хорьякова Н.М., Агеев Е.В. Использование медного электроэрозионного нанопорошка в гальванических покрытиях поршневых колец // Мир транспорта и технологических машин. 2015. № 3 (50). С 24-33.

10. Состав, структура и свойства медного электроэрозионного порошка, полученного в среде керосина / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, С.В. Пикалов, Е.В. Агеев // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2015. № 4. С 4-8.

11. Исследования гранулометрического и элементного состава электроэрозионного медно-углеродного порошка, полученного в керосине / Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, И.В. Егельский, Д.А. Чумак-Жунь // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2015. № 4 (17). С.18.24.

12. Агеева Е.В., Хорьякова Н.М., Латыпова Г.Р. Определение оптимальных электрических параметров установки электроэрозионного диспергирования для диспергирования медных отходов в воде дистиллированной постановкой факторного эксперимента // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 6 (69). С. 28-35.

13. Хорьякова Н.М., Агеев Е.В., Латыпов Р.А. Сравнительная характеристика морфологии и твердости спеченных образцов из электроэрозионного медного порошка и ПМС-1 // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. № 1 (22). С.14-21.

14. Сравнительный рентгеноспектральный микроанализ медного порошка, полученного электроэрозионным диспергированием, и медного порошка ПМС-1 / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова // ЭлектроМеталлургия. 2017. № 4. С.36-40.

15. Хорьякова Н.М., Малюхов В.С. Морфология и элементный состав медного порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования // Современные материалы, техника и технология: материалы 3-й Междунар. науч.-прак. конф.: в 3 т. Курск, 2013. Т. 1. С. 388-390.

16. Хорьякова Н.М., Агеев Е.В. Разработка медных гальванических покрытий для поршневых колец, модифицированных наночастицами электроэрозионной меди // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2015. Т. 2. №. 1. С. 337-339.

17. Пат. 2449859, Российская Федерация, С2, В22F9/14. Установка для получения нанодисперсных порошков из токопроводящих материалов / Агеев Е.В.; заявитель и патентообладатель Юго-Западный государственный университет. № 2010104316/02; заяв. 08.02.2010; опубл. 10.05.2012. 4 с.

Поступила в редакцию 25.02.2019

Подписана в печать 18.03.2019

Reference

1. Antsiferov V. N. Perspektivnye poroshkovye materialy [Perspective powder materials]. Perm: Publishing house of Perm national research Polytechnic University Publ., 2012, 117 p. (In Russ.).

2. Ageev E. V., Khorjakova N. M. Povyshenie sroka sluzhby porshnevykh kolets DVS mednymi elektroerozionnymi poroshkami [Improvement of service life of piston rings of internal combustion engines copper electroerosion powders]. *Trudy GOSNITI = Proceedings of GOSNITI*, 2017, no. 126, pp. 137-143 (In Russ.).

3. Pat. 2599476 Russian Federation, МПК51 В 22 F 9/14, WITH 22 IN 7/00, 3/00, 82 IN. A method of producing copper powder from the waste. Ageev E. V., Khorjakova N. M. Gvozdev E. A., Ageev E. V.; applicant and patentee of the Southwest State University. No. 2014135563/13; stated. 02.09.14; publ. 10.10.16, Byul. no. 28, 5 p.: Il.

4. Pat. 2597445 Russian Federation, МПК51 В 22 F 9/14, C 22 b 7/00 C 22 b 15/00, 30/00 82 Y. Method of production of nanopowder of copper from waste. Ageev E. V., Khorjakova N. M. A. E. Gvozdev, E. V. Ageeva, Malahov V. S.; applicant and patentee of the Southwest State University. No. 2014135539/02; stated. 02.09.14; publ. 10.09.16, byl. No. 25. 4 p.: Il.

5. Khorjakova N. M., Malahov V. S. Application of copper powders and the dependence of their properties from the particle size. The Perspective development of science, engineering and technology: collection of reports of III int. science-practical Conf. Kursk, 2013, vol. 3, pp. 258-362 (In Russ.).

6. Ageeva, E. V. Khorjakova N. M., Ageev E. V. Issledovanie formy i morfologii elektroerozionnykh mednykh poroshkov, poluchennykh iz otkhodov [Investigation of the shape and morphology of the EDM copper powders obtained from waste]. *Vestnik mashinostroeniya = Messenger of mechanical engineering*, 2014, no. 8, pp. 73-75 (In Russ.).

7. Ageeva E. V., Khorikova N.M., Ageev E.V. Issledovanie raspredeleniya mikrochastits po razmeram v poroshkakh, poluchennykh elektroerozionnym dispergirovaniem mednykh otkhodov [The Study of the distribution of microparticles by size in powders obtained by electro erosion dispersing of copper waste]. *Vestnik mashinostroeniya = Messenger of mechanical engineering*, 2014, no. 9, pp. 63-65 (In Russ.).

8. Ageeva E.V., Khorikova N.M., Latypov R.A., Burak P.I. Rentgenostrukturnyi analiz poroshka, poluchennogo elektroerozionnym dispergirovaniem v srede kerosina [X-ray diffraction analysis of the powder obtained electro erosion dispersion in the environment of kerosene]. *Mezhdunarodnyi tekhniko-ekonomicheskii zhurnal = The international technical-economic journal*, 2015, no. 2, pp. 59- 65 (In Russ.).

9. Ageev E.V., Khorikova N.M., Ageev E.V. Ispol'zovanie mednogo elektroerozionnogo nanoporoshka v gal'vanicheskikh pokrytiyakh porshnevnykh kolets [The Use of EDM copper nanopowder in the galvanic coatings of piston rings]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin = World of transport and technological machines*, 2015, no. 3 (50), pp. 24-33 (In Russ.).

10. Ageeva E. V., Khorikova N.M., Pikalov S.V., Ageev E.V. Sostav, struktura i svoystva mednogo elektroerozionnogo poroshka, poluchennogo v srede kerosina [Composition, structure and properties of copper spark erosion powder obtained in an environment of kerosene]. *Izvestiya Vuzov. Powder metallurgy and functional coatings*, 2015, no. 4, pp. 4-8 (In Russ.).

11. Khorikova N.M., Ageeva E.V., Ageev E.V., Egelsky I.V., Chumak-Zhun' D.A. Issledovaniya granulometricheskogo i elementnogo sostava elektroerozionnogo mednouglerodnogo poroshka, poluchennogo v kerosine [Studies of granulometric and elemental composition of electrical discharge machining of copper-carbon powder obtained in the kerosene]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series Engineering and Technologies*. 2015, no. 4 (17), pp. 18.24 (In Russ.).

12. Ageeva E.V., Khorikova N.M., Latypova G.R. Opredelenie optimal'nykh elektricheskikh parametrov ustanovki elektroerozionnogo dispergirovaniya dlya dispergirovaniya mednykh otkhodov v vode distillirovannoi postanovkoi faktornogo eksperimenta [Determination of the optimal electrical parameters of electroerosive dispersion for dispersion of copper waste in water distilled formulation of the factorial experiment]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no. 6 (69), pp. 28-35 (In Russ.).

13. Khorikova N.M., Ageev E.V., Latypov R.A. Sravnitel'naya kharakteristika morfologii i tverdosti spechennykh obraztsov iz elektroerozionnogo mednogo poroshka i PMS-1 [Comparative characteristics of the morphology and hardness of sintered samples of EDM copper powder PMS-1]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series Engineering and Technologies*, 2017, no. 1 (22), pp. 14-21 (In Russ.).

14. Latypov R.A., Ageev E.V., Ageeva E.V., Khorikova N.M. Sravnitel'nyi rentgenospektral'nyi mikroanaliz mednogo poroshka, poluchennogo elektroerozionnym dispergirovaniem, i mednogo poroshka PMS-1 [Comparative x-ray microanalysis of the copper powder

obtained EDM dispersion, and copper powder PMS-1]. *ElektroMetallurgiya = Electrometallurgy*, 2017, no. 4, pp. 36-40 (In Russ.).

15. Khorikova N.M., Malahov V.S. The morphology and elemental composition of copper powder, obtained by electroerosion dispersion. Modern materials, equipment and technology. Materials of the 3rd Intern. science.-practical. Conf. Kursk: Southwest State University Publ., 2013, vol.1, pp. 388-390 (In Russ.).

16. Khorikova N. M., Ageev E.V. Razrabotka mednykh gal'vanicheskikh pokrytii dlya porshnevnykh kolets, modifitsirovannykh nanochastitsami elektroerozionnoi medi [Development copper galvanic coatings for piston rings, modified with nanoparticles of copper EDM]. *Al'ternativnye istochniki energii v transportno-tekhnologicheskoi kompleks: problemy i perspektivy ratsional'nogo ispol'zovaniya = Alternative energy sources in the transport-technological complex: problems and prospects of rational use*, 2015, vol. 2, no.1, pp. 337-339 (In Russ.).

17. Pat. 2449859, Russian Federation, C2, B22F9/14. Installation for obtaining nanodisperse powders from conductive materials. Ageev E.V.; applicant and patentee of Southwest State University. No 2010104316/02; stated. 08.02.2010; publ. 10.05.2012. 4 p.

Received 25.02.2019

Accepted 18.03.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Екатерина Владимировна Агеева, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Yekaterina V. Ageeva, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: ageev-ev@yandex.ru

Оксана Геннадьевна Локтионова, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: log@swsu.ru

Oksana G. Loktionova, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: log@swsu.ru

Вадим Васильевич Куц, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Vadim V. Kuts, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Наталья Михайловна Хорькова, кандидат технических наук, старший преподаватель ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: 79103114369@yandex.ru

Natalya M. Khorkova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: 79103114369@yandex.ru

СТРОИТЕЛЬСТВО

CONSTRUCTION

УДК 621.644:620.197.5

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-74-84

Исследование процесса генерации термоэлектричества при утилизации низкопотенциального тепла сбросных газов**С. В. Ежов, Е. Н. Семичева ✉, А. П. Бурцев,
В. И. Зенченков, Д. А. Ермаков**

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94

✉ e-mail: nsemicheva@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Целью исследования является разработка экспериментальной конструкции комплексного воздухоподогревателя, проведение и анализ экспериментов, а также, определение основных характеристик термоэлектрического генератора при утилизации низкопотенциального тепла сбросных газов.

Методы. Экспериментальная установка состоит из двух блоков – термоэлектрического генератора, работающего по принципу перекрестного теплообмена, для утилизации тепла с параллельным нагревом приточного воздуха, который подается в виде смеси в горелочное устройство котельного агрегата, и блока-адсорбера, заполненного доменным шлаком для очистки сбросных газов от оксидов азота, серы и углерода. Для достижения поставленных целей в работе за основу предлагается использовать эффект термоэлектричества, работающий по принципу преобразования тепловой энергии в электричество при разности температур между горячими и холодными спаями в термоэлектрических секциях, состоящих из двух разных по свойству электроотрицательности металлов. Одновременно происходит интенсификация процесса адсорбции вредных компонентов гранулированными доменными шлаками в комплексном воздухоподогревателе, что снижает теплосодержание и температуру сбросных газов, уменьшает выбросы дымовых газов и, как следствие, повышает экологическую безопасность, прилегающей к котельной территории. В том числе проводилось исследование противоточного теплообмена в конструкции термоэлектрического генератора.

Результаты. Главным результатом проведенной исследовательской работы является разработка экспериментальной конструкции комплексного воздухоподогревателя, методики проведения эксперимента и определение основных характеристик процесса генерации термоэлектричества.

Заключение. Применение такого комплексного воздухоподогревателя позволяет повысить эффективность теплогенерирующих установок малой, средней и большой мощности, установленных в центральных производственно-отопительных котельных, индивидуальных домах многоквартирного и одноквартирного типов. Полученную электроэнергию с последующим преобразованием можно использовать для энергоснабжения автоматики котлов малой, средней и большой мощности, а также энергоснабжения станции катодной защиты от электрохимической коррозии хвостовых поверхностей, образующейся в результате наличия водяных паров в сбросных газах.

Ключевые слова: термоэлектричество; электроснабжение; теплогенерирующая установка; коэффициент теплопередачи; спай; плотность; кинематическая вязкость; температуропроводность; дымовые газы.

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

Для цитирования: Исследование процесса генерации термоэлектричества при утилизации низкопотенциального тепла сбросных газов / С. В. Ежов, Е. Н. Семичева, А. П. Бурцев, В. И. Зенченков, Д. А. Ермаков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 74-84. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-74-84.

UDC 621.644:620.197.5

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-74-84

Study of the Process of Generation of Thermoelectricity in Low Grade Heat Recovery of Waste Gases

Vladimir S. Ezhov, Natalia E. Semicheva ✉, Aleksey P. Burtsev,
Vladimir I. Zenchenkov, Dmitrii A. Ermakov

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

✉ e-mail: nsemicheva@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of the study is to develop an experimental design of an integrated air heater, conduct and analyze experiments as well as to determine the main characteristics of a thermoelectric generator in low-grade heat recovery of waste gases.

Methods. The experimental unit consists of two blocks – a thermoelectric generator operating on the principle of cross heat exchange for heat recovery with concurrent heating of the incoming air, which is supplied as a mixture to the burner device of the boiler unit; and an adsorber block filled with blast furnace slag for cleaning the waste gases from nitrogen, sulphur and carbon oxides. To achieve these goals, the work is based on the proposed thermoelectricity effect, which works on the principle of converting thermal energy into electricity at a temperature difference between hot and cold junctions in thermoelectric sections consisting of two metals different in their electronegativity. At the same time, in an integrated air heater, the intensification of the process of adsorption of harmful components by granulated blast furnace slag takes place, which reduces the heat content and temperature of waste gases, reduces emissions of flue gases and, as a result, increases environmental safety of the area adjacent to the boiler. In particular, the study of countercurrent heat exchange in the design of the thermoelectric generator was carried out.

Results. The main result of the research work is the development of an experimental design of an integrated air heater, an experimental technique and the determination of the main characteristics of the thermoelectricity generation process.

Conclusion. The use of such an integrated air heater can improve the efficiency of heat-generating units of low, medium and high power installed in the central heating stations, multi-family and single-family houses. The gained electric power with the subsequent transformation can be used for power supply of automatic equipment of boilers of low, medium and high power, and for power supply of the stations of cathodic protection against electrochemical corrosion of back-end surfaces formed as a result of the presence of water vapors in waste gases.

Keywords: thermoelectricity; power supply; heat generating unit; heat transfer coefficient; junction; density; kinematic viscosity; thermal diffusivity; flue gases.

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

For citation: Ezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., Zenchenkov V. I., Ermakov D. A. *Study of the Process of Generation of Thermoelectricity in Low Grade Heat Recovery of Waste Gases. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(2): 74-84 (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-74-84.

Введение

Актуальной проблемой развития топливно-энергетического и жилищно-коммунального комплексов Российской Федерации является проблема энергосбережения и экологической безопасности. Решение данных проблем позволит обеспечить устойчивый рост эффективности получения и распределения тепловой энергии от источника до конечного потребителя. С этим тесно связан экономический рост страны, улучшение экологической обстановки и безопасность жизнедеятельности населения [1].

Одним из главных направлений повышения эффективности теплогенерирующих установок является применение устройств и комплексов оборудования по снижению теплосодержания и температуры дымовых газов, уменьшение выбросов дымовых газов и как следствие повышение экологической безопасности, прилегающей к котельной территории. Для достижения поставленных целей в работе предлагается использовать эффект термоэлектричества, что обеспечивает автономное электроснабжение противокоррозионного оборудования и интенсификации процесса адсорбции вредных компонентов гранулированными доменными шлаками в комплексном воздухоподогревателе [2].

Применение в котельных оборудования [3] глубокой утилизации тепла

или установок использования скрытой теплоты парообразования уходящих дымовых газов (например, контактных теплообменников, воздухоподогревателей) повышает общий КПД котельной на 1-3%.

Воздухоподогреватели [4, 5] позволяют утилизировать тепловыделения от котлов путем контакта дымовых газов и дутьевого воздуха, подаваемого дутьевым вентилятором из верхней зоны котельной (воздухоподогреватели различного типа повышают экономию топлива на 1-4%).

Для осуществления повышения степени утилизации тепла сбросных газов использовали эффект термоэлектричества – явления прямого преобразования теплоты в электричество в проводниках при прямом нагреве и охлаждении спаев двух проводников проходящим током. Получаемая на начальном этапе термоэлектрическая эмиссия зависит только от физико-химических параметров используемых материалов и в большей степени от температур горячего и холодного элементов (спаев) [6].

В основе эффекта термоэлектричества лежит процесс попутного получения электричества в результате термоэлектрической эмиссии электронов при разности температур из низкопотенциальной теплоты в термоэлектрических преобразователях, которые состоят из разных по физико-химическим и элек-

троотрицательным параметрам металлов, соединенных между собой на противоположных концах точечной сваркой [7].

Материалы и методы решения задачи

Для достижения вышеуказанных целей была разработана экспериментальная установка и проведены эксперименты, на основании которых разработана методика расчета основных характеристик термоэлектрических генераторов.

В процессе проведения эксперимента для нагревания горячих спаев использовался горячий воздух, подогретый в калорифере, а для охлаждения и рассеивания тепла использовался холодный воздух, забираемый из помещения лаборатории с помощью канального вентилятора.

Для более глубокого изучения противоточного теплообмена в конструкции комплексного воздухоподогревателя в процессе проведения эксперимента фиксировались скорости и массовый расход. Опыты по изучению теплообмена при противотоке в термоэлектрической секции проводились для ряда фиксированных скоростей и расхода воздуха на экспериментальной установке [8, 9, 10].

Экспериментальная установка с описанием основных конструктивных элементов приведена на рисунке 1.

Основными характеристиками термоэмиссионных элементов, сделанных

из хромели (М1) и копели (М2), являются: коэффициент термоЭДС $\alpha = 12,97 \cdot 10^{-3}$ В/К; добротность $Z = 2,8 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹; коэффициент электропроводимости $\sigma = 8 \cdot 10^4$ Ом⁻¹·м⁻¹ [10, 11].

Показания ртутных термометров в точках на входе и на выходе их воздухоподогревателя определялись как среднеарифметическая. Средняя скорость воздуха в каналах термоэлектрических секций определялась по выражению

$$\bar{\omega} = c_n \cdot \omega_{анем}, \quad (1)$$

где $c_n = 0,91$ – коэффициент неравномерности расхода.

Тепловая мощность воздушного потока, проходящего через щели термоэлектрического генератора, определялась из расчетного уравнения теплового баланса:

$$Q' = \bar{\gamma}_v \cdot \bar{G}_{кан} \cdot (t'_{вых} - t'_{вх}) \cdot 10^3, \quad (2)$$

где $\bar{\gamma}_v = c_v \cdot \rho_v$, c_v , ρ_v – теплосодержание и массовая плотность при средней температуре, кДж/(кг °С), кг/м³; $\bar{G}_{кан}$ – массовый расход в канале воздухоподогревателя $\bar{G}_{кан} = \bar{\omega} \cdot F_{кан}$, м³/ч; $t'_{вх}$, $t'_{вых}$ – измеряемые температуры горячего потока воздуха на входе и выходе из канала теплообменного элемента, для прохода нагреваемой воздушной среды, °С; $F_{кан}$ – площадь поперечного сечения канала, измеряемая исходя из геометрических характеристик каналов, м.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – корпус; 2 – патрубок для входа греющей среды; 3 – строительный фен; 4 – осевой вентилятор; 5 – подставка под вентилятор; 6 – блок LED-подсветки

На основании метода стационарных тепловых потоков (закон Ньютона-Рихмана) был определен коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности канала к термоэлектрическому преобразователю:

$$dQ' = \alpha_{F_{cm}} (t'_{г.см} - t') dF_{cm}, \quad (3)$$

где $t'_{г.см}$, t' – температуры теплоотдающей поверхности и воздушной среды соответственно, °C; F_{cm} – площадь теплоотдающей поверхности, м².

При условии, что величины, входящие в уравнение (3), относятся к небольшим элементам расчетной поверхности воздухоподогревателя, средний коэффициент теплоотдачи от поверхности канала к термоэлектрическим секциям определяются для каждого опыта исходя из зависимости [12]:

$$\bar{\alpha}' = \frac{\frac{1}{L} \int_0^L q(x) dx}{\frac{1}{L} \int_0^L (t'_{г.см} - t') dx} =$$

$$= \frac{Q'}{F_{cm} (\bar{t}'_{г.см} - \bar{t}')} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}; \quad (4)$$

где F_{cm} – поверхность теплообменной поверхности, м²; $\bar{t}'$ – средняя температура потока в канале, определяемая из зависимости, °C:

$$\bar{t}' = \frac{t'_{вх} + t'_{вых}}{2}, \quad (5)$$

где $\bar{t}'_{г.см}$ – средняя температура потока, определяемая по формуле, °C:

$$\bar{t}'_{г.см} = \bar{t}_{cm} - \frac{Q'}{\frac{\lambda_{cm}}{\delta_{cm}}}, \quad (6)$$

где δ_{cm} – толщина теплопередающей поверхности 2 мм; λ_{cm} – коэффициент теплопроводности материала теплопередающей поверхности нагрева, Вт/(м·°C); $\bar{t}_{cm}$ – средняя температура стенки, определяемая по формуле, °C:

$$\bar{t}_{cm} = \frac{\bar{t}' + \bar{t}''}{2}, \quad (7)$$

где $\bar{t}''$ - средняя температура в канале, определяемая по следующей формуле аналогично (5), °C.

$$\bar{t}'' = \frac{t''_{ex} + t''_{vix}}{2}, \quad (8)$$

где t''_{ex}, t''_{vix} - температура воздуха на входе и выходе из канала воздухоподогревателя, для прохода греющей воздушной среды, °C.

Исходя из зависимости было определено среднее значение коэффициента [12] теплопередачи для каждого отдельного опыта:

$$\bar{k} = \frac{Q'}{F_{cm} \cdot \Delta \bar{t}}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}, \quad (9)$$

где $\Delta \bar{t}$ - средний температурный напор (°C), определяемый при $\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_m} \leq 1,7$, с достаточной точностью, как среднеарифметическая разность температур по формуле

$$\Delta \bar{t} = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_m}{2}, \text{ °C}; \quad (10)$$

где $\Delta t_{\delta}, \Delta t_m$ - разности температур сред на другом конце поверхности нагрева, соответственно, °C.

$$\Delta t_{\delta} = t''_{ex} - t'_{vix}, \quad (11)$$

$$\Delta t_m = t''_{vix} - t'_{ex}, \quad (12)$$

Воспринятое от греющей среды в канале количество теплоты, определяется исходя из следующей формулы:

$$Q'' = \bar{\gamma}_e \cdot \bar{V}_{кан} \cdot (t''_{ex} - t''_{vix}) \cdot 10^3, \text{ Вт}. \quad (13)$$

По зависимости (14) для каждого опыта определяется средний коэффициент теплоотдачи [12] от греющего потока в канале к поверхности термоэлектрической секции:

$$\bar{\alpha}'' = \frac{Q''}{F_{cm} \cdot (\bar{t}'' - \bar{t}_{s,cm})}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}, \quad (14)$$

где F_{cm} - расчетная поверхность теплоотдачи теплообменной поверхности (стенки), $F_{cm} = 0,049 \text{ м}^2$; $\bar{t}''$ - средняя температура нагреваемого воздушного потока в канале, °C; $\bar{t}_{s,cm}$ - средняя температура поверхности, нагреваемой горячим воздушным потоком, определяется по формуле, °C:

$$\bar{t}_{s,cm} = \frac{Q''}{\frac{\lambda_{cm}}{\delta_{cm}}} + \bar{t}_{cm}, \text{ °C}, \quad (15)$$

где $\bar{t}_{cm}$ - средняя температура стенки, °C.

Среднее значение коэффициента теплопередачи [12] для каждого опыта определялось из следующего соотношения:

$$\bar{k} = \frac{1}{\frac{1}{\bar{\alpha}'} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\bar{\alpha}''}}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}. \quad (16)$$

Результаты и их обсуждение

В таблице приведены результаты экспериментальных исследований с последующим определением основных характеристик термоэлектрического генератора.

Графически полученные экспериментальные данные представлены на рисунках 2-3.

Результаты экспериментальных исследований

Наименование измеряемой величины	Обозначение	Размерность	Номер серии опытов		
			1	2	3
Температура на входе в канал (холодный поток)	$t'_{вх}$	°C	25,4	25,4	25,4
Температура на выходе из канала (холодный поток)	$t'_{вых}$	°C	27,7	28,1	29,2
Температура на входе в канал (горячий поток)	$t''_{вх}$	°C	81,7	150,4	178,7
Температура на выходе из канала (горячий поток)	$t''_{вых}$	°C	42,8	55,1	63,8
Скорость воздуха (холодный поток)	$\bar{w}_{наг}$	м/с	5,1	5,1	5,1
Скорость воздуха (горячий поток)	$\bar{w}_{пр}$	м/с	1,1	1,1	1,1
Средняя температура	$\bar{t}'$	°C	26,6	26,8	27,3
Количество тепла, воспринятое поверхностью	Q'	Вт	552	660	990
Коэффициент теплоотдачи от стенки канала к холодному воздуху	$\bar{\alpha}'$	Вт/(м ² °C)	104,3	58,5	72,8
Напряжение	V	Вольт	1,14	2,02	2,26
Сила тока	I	А	0,356	0,631	0,728
Мощность	N	Вт	0,406	1,275	1,645

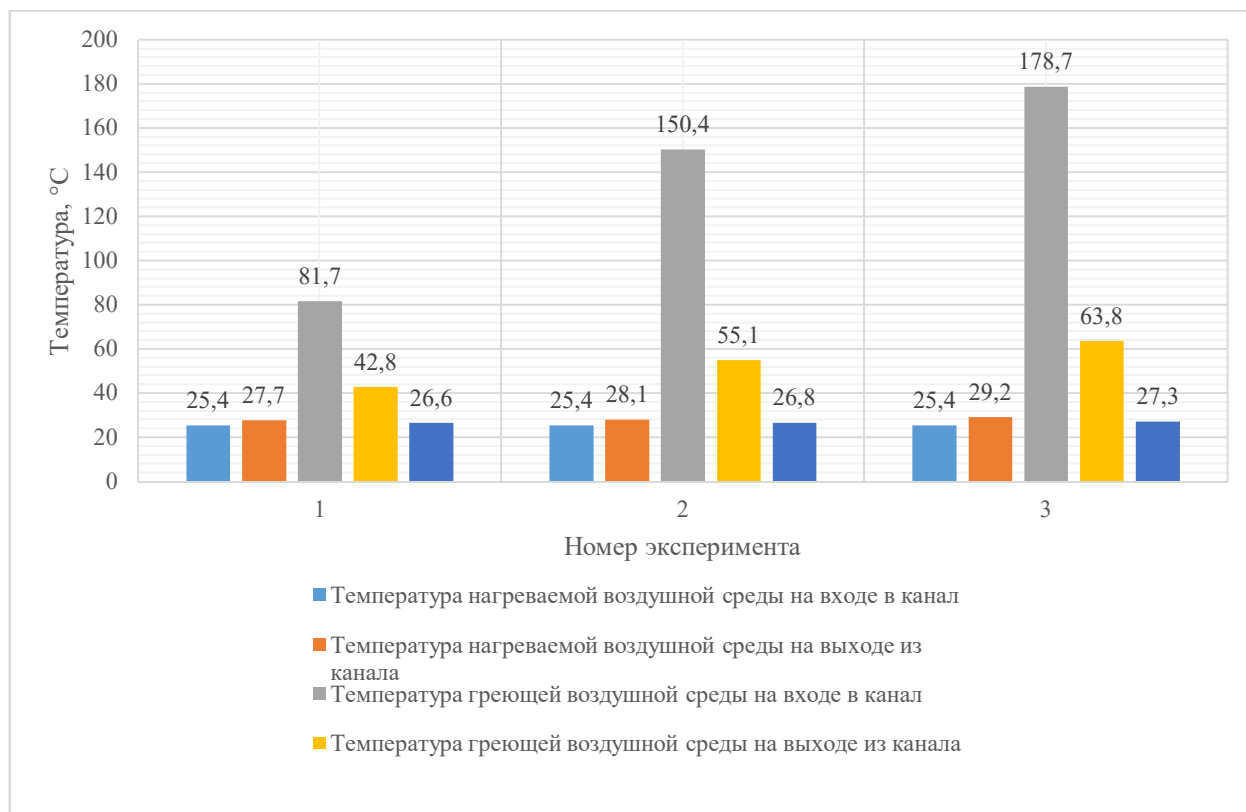


Рис. 2. Распределение температур в зависимости от номера эксперимента

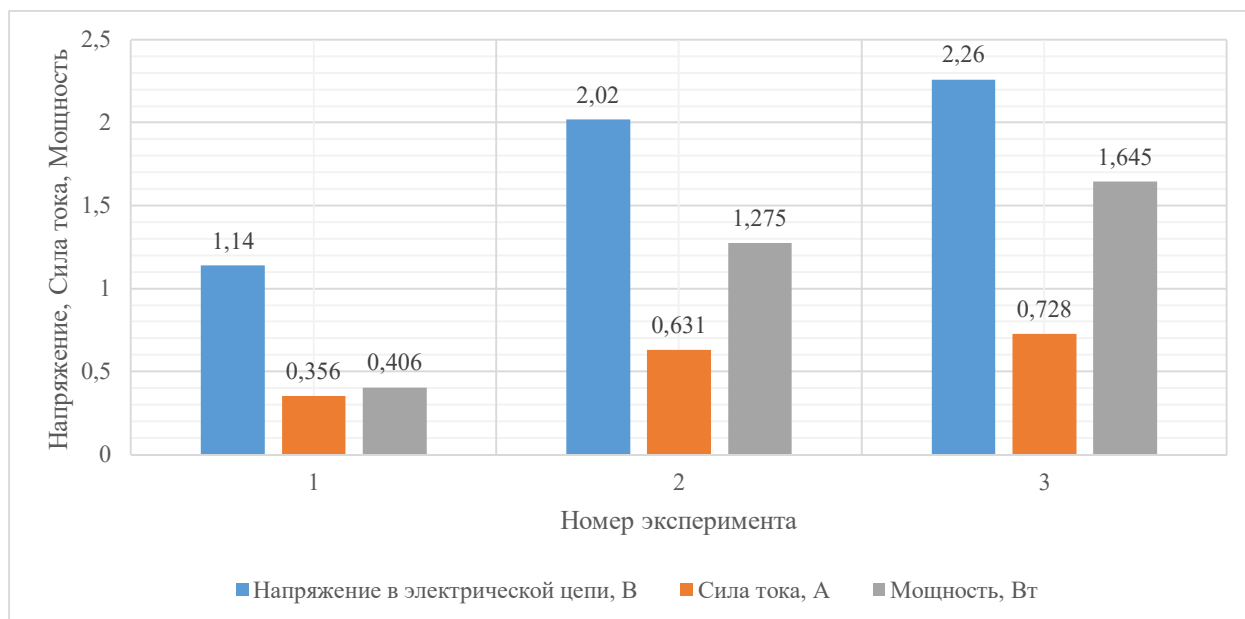


Рис. 3. Распределение показателей напряжения, силы тока, мощности в зависимости от номера эксперимента

Выводы

Основными выводами данной статьи являются:

- разработана экспериментальная конструкция воздухоподогревателя, имеющая в своем составе термоэлектрический источник ЭДС, работающий в результате попутного преобразования тепла в электричество, позволяет утилизировать низкопотенциальное тепло сбросных газов с 140°C до 60°C;
- проведены экспериментальные исследования по определению основных параметров работы термоэлектрического генератора при перекрестном

теплообмене между сбросными газами и холодным воздухом на лабораторной установке по утилизации тепла уходящих сбросных газов с попутной генерацией термоэлектричества;

- в результате перекрестного теплообмена температура сбросных газов на выходе из комплексного воздухоподогревателя снижается на 40-60%, при этом фиксируется увеличение КПД котельного агрегата на 1-1,5% вследствие увеличения температуры приточного воздуха в горелочное устройство котла с 20°C до 55°C.

Список литературы

1. Разработка эффективного комплексного коррозионно-устойчивого воздухоподогревателя / В.С. Ежов, Н.Е. Семичева, А.П. Бурцев, М.Е. Попова, Д.Д. Фатеев // Сборник научных трудов 5-й Международной научной конференции «Юность и знания – гарантия успеха – 2018». Курск, 2018. С. 291-294.
2. Ежов В.С., Шик Д.А., Бурцев А.П. Комплексный воздухоподогреватель для нагрева воздуха и очистки дымовых газов // Молодежь и наука: шаг к успеху: сборник

научных статей 2-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых. Курск, 2018. С. 79-83.

3. Разработка мероприятий по повышению КПД теплогенерирующих установок на ТЭЦ СЗР г. Курска / В.С. Ежов, Н.Е. Семичева, А.П. Бурцев, А.А. Телегин // Молодежь и системная модернизация страны: сборник научных статей 3-й Международной молодежной научной конференции студентов и молодых ученых. Курск, 2018. С. 187-191.

4. Повышение эффективности системы очистки дымовых газов котельной на природном газе в г. Курске / В.С. Ежов, В.А. Жмакин, А.П. Бурцев, А.Г. Смирнов // Молодежь и системная модернизация страны: сборник научных статей 3-й Международной молодежной научной конференции студентов и молодых ученых. Курск, 2018. С. 196-200.

5. Котельная с коррозионностойким теплообменным оборудованием / В.С. Ежов, Н.Е. Семичева, А.П. Бурцев, И.С. Забелин // Будущее науки – 2018: сборник научных статей 8-й Международной молодежной научной конференции перспективных разработок молодых ученых. Курск, 2018. С. 343-347.

6. Моделирование прямого преобразования тепла в электричество для энергоснабжения индивидуального теплового пункта / В.С. Ежов, С.В. Павлов, А.П. Бурцев, А.В. Брежнев, Р.С. Дроzhzhin // Научно-технический производственный журнал Наука 2.0 «БСТ-Бюллетень строительной техники». 2018. №3.

7. Энергосберегающее устройство на основе термоэлектричества / В.С. Ежов А.П. Бурцев, К.М. Голубничий, Д.А. Ермаков, М.С. Герасимов // Научно-технический производственный журнал Наука 2.0 «БСТ-Бюллетень строительной техники». 2018. №3.

8. Исследование процесса утилизации теплоты уходящих дымовых газов с попутным получением электрической энергии / В.С. Ежов, Н.Е. Семичева, А.С. Якушев, А.Ю. Журавлев // Биосфера–совместимые технологии в развитии регионов: сборник научных трудов Международной конференции. Курск. 2011. С. 20-24.

9. Ежов В.С., Семичева Н.Е., Бурцев А.П. Использование термоэлектричества в энергосберегающих теплотехнологиях: монография. Курск, 2017. 154 с.

10. V. S. Ezhov, N. E. Semicheva, S. V. Berezin, V. V. Makhova, A. Petrovich Burtsev, A. V. Brezhnev, R. S. Drozhzhin / independent power supply source for the station of cathodic protection of pipelines against corrosion // Journal of Applied engineering science. 2017. № 4. P. 501-505.

11. Yezhov V., Yemelianov S., Semicheva N., S Berezin., Burtsev A., Amelin V. Investigation of technical characteristics of thermoelectric add-on for preure jet burners // Journal of Applied engineering science. 2016. № 4. С. 461-464.

12. Гальперин Л.Г. Моделирование тепловых процессов. М., 2011. 112 с.

Поступила в редакцию 05.02.2019

Подписана в печать 04.03.2019

Reference

1. Ezhov V.S., Semicheva N.E., Burcev A.P., Popova M.E., Fateev D.D. Razrabotka jeffektivnogo kompleksnogo korrozionno-ustojchivogo vozduhopodogrevatelja. Sbornik nauchnyh trudov 5-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "JUnost' i znaniya – garantija uspeha – 2018". Kursk, 2018, pp. 291-294 (In Russ.).
2. Ezhov V.S., SHik D.A., Burcev A.P. Kompleksnyj vozduhopodogrevatel' dlja nagreva vozduha i ochistki dymovyh gazov. Sbornik nauchnyh statej 2-j Vserossijskoj nauchnoj konferencii perspektivnyh razrabotok molodyh uchenyh "Molodezh' i nauka: shag k uspehu". Kursk, 2018, pp. 79-83 (In Russ.).
3. Ezhov V.S., Semicheva N.E., Burcev A.P., Telegin A.A. Razrabotka meroprijatij po povysheniju KPD teplogenerirujushhih ustanovok na TJEC SZR g. Kurska. Sbornik nauchnyh statej 3-j Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii studentov i molodyh uchenyh "Molodezh' i sistemnaja modernizacija strany". Kursk, 2018, pp. 187-191 (In Russ.).
4. Ezhov V.S., ZHmakin V.A., Burcev A.P., Smirnov A.G. Povysenie jeffektivnosti sistemy ochistki dymovyh gazov kotel'noj na prirodnom gaze v g. Kurske. Sbornik nauchnyh statej 3-j Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii studentov i molodyh uchenyh "Molodezh' i sistemnaja modernizacija strany". Kursk, 2018, pp. 196-200 (In Russ.).
5. Ezhov V.S., Semicheva N.E., Burcev A.P., Zabelin I.S. Kotel'naja s korrozionnos-tojkim teploobmennym oborudovaniem. Sbornik nauchnyh statej 8-j Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii perspektivnyh razrabotok molodyh uchenyh "Budushhee nauki – 2018". Kursk, 2018, pp. 343-347 (In Russ.).
6. Ezhov V.S., Pavlov S.V., Burcev A.P., Brezhnev A.V., Drozhzhin R.S. Modelirovanie prjamoego preobrazovaniya tepla v jelektrichestvo dlja jenergo-snabzhenija individual'nogo teplovogo punkta. *Nauchno-tehnicheskij proizvodstvennyj zhurnal. Nauka 2.0 "BST-Bjulleten' stroitel'noj tehniki"*, 2018, no.3 (In Russ.).
7. Ezhov V.S., Burcev A.P., Golubnichij K.M., Ermakov D.A., Gerasimov M.S. JEnergosberegajushhee ustrojstvo na osnove termoelektrichestva. *Nauchno-tehnicheskij proizvodstvennyj zhurnal Nauka 2.0 "BST-Bjulleten' stroitel'noj tehniki"*, 2018. no.3 (In Russ.).
8. Ezhov V.S., Semicheva N.E., JAKushev A.S., ZHurvlev A.JU. Issledovanie processa utilizacii teploty uhodjashhih dymovyh gazov s poputnym polucheniem jelektricheskoy jenerгии. Sbornik nauchnyh trudov Mezhdunarodnoj konferencii. Biosfero–sovmestimye tehnologii v razvitii regionov. Kursk, 2011, pp. 20-24 (In Russ.).
9. Ezhov V.S., Semicheva N.E., Burcev A.P. Ispol'zovanie termoelektrichestva v jenergosberegajushhih teplotehnologijah. Kursk, 2017, 154 p. (In Russ.).
10. Ezhov V. S., Semicheva N. E., Berezin S. V., Makhova V. V., Burtsev A. P., Brezhnev A. V., Drozhzhin R. S. Independent power supply source for the station of cathodic pro-

tection of pipelines against corrosion. *Journal of Applied engineering science*, 2017, no. 4, pp. 501-505.

11. Yezhov V., Yemelianov S., Semicheva N. Berezin, S., Burtsev A., Amelin V. Investigation of technical characteristics of thermoelectric add-on for preeure jet burners. *Journal of Applied engineering science*, 2016, no. 4, pp. 461-464.

12. Gal'perin L.G. Modelirovanie teplovyh processov. Moscow, 2011, 112 p. (In Russ.)

Received 05.02.2019

Accepted 04.03.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Ежов Владимир Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоводоснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vl-ezhov@yandex.ru

Vladimir S. Ezhov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Heating, Gas and Water Supply Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: vl-ezhov@yandex.ru

Семичева Наталья Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент, завкафедрой теплогазоводоснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация e-mail: nsemicheva@yandex.ru

Natalia E. Semicheva, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Heating, Gas and Water Supply Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: nsemicheva@yandex.ru

Бурцев Алексей Петрович, аспирант кафедры теплогазоводоснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ap_burtsev@mail.ru

Aleksey P. Burtsev, Post-Graduate Student, Heating, Gas and Water Supply Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: ap_burtsev@mail.ru

Зенченков Владимир Игоревич, аспирант кафедры теплогазоводоснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tgv-kstu6@yandex.ru

Vladimir I. Zenchenkov, Post-Graduate Student, Heating, Gas and Water Supply Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: tgv-kstu6@yandex.ru

Ермаков Дмитрий Андреевич, студент кафедры электроснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: DmitriyErmakov98@yandex.ru

Dmitrii A. Ermakov, Student Electric Power Supply Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: DmitriyErmakov98@yandex.ru

УДК 628.81

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-85-96

Исследование теплового режима зданий ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» с разработкой мероприятий по повышению энергетической эффективности

Е.В. Умеренков ✉, Э.В. Умеренкова, Н.Е. Семичева, А.А. Насонова,
А.А. Сазонова

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94

✉ e-mail: tgv-kstu6@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Целью работы является проведение прикладного исследования теплового режима зданий ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» на основании результатов энергоаудита и разработка комплекса научно-технических мероприятий тепловой санации, включающих поиск целесообразного варианта утепления ограждающих конструкций и повышение эффективности работы системы теплоснабжения путем аккумулирования тепловой энергии.

Методы. Для достижения поставленных целей в работе на основании результатов энергоаудита были определены теплоэнергетические показатели объектов исследования и сравнение их с нормативными величинами. Проанализированы возможные варианты доведения термического сопротивления ограждающих конструкций до требуемых значений, в том числе, с учетом минимизации капитальных затрат. Для снятия избыточного в ночное время количества тепла с системы отопления и его рационального использования с целью экономии потребления тепловой энергии предлагается включение в систему теплопотребления аккумуляторов теплоты на фазовом переходе. В дневное время накопленную тепловую энергию предполагается использовать для нужд горячего водоснабжения (ГВС). Для децентрализованной системы теплоснабжения интеграция тепловых аккумуляторов позволит сгладить неравномерность нагрузок ГВС, а отключение основного источника (теплогенератора) на время использования аккумулированной теплоты даёт положительный экологический эффект, т.е. обеспечивает сокращение выбросов парниковых газов. Предлагается к использованию ряд способов повышения эффективности фазопереходного аккумулятора теплоты кожухотрубного типа.

Результаты. Результатом проведенной исследовательской работы является разработка ряда инженерно-технических решений для обеспечения энергетической эффективности и повышения потребительского качества объектов исследования.

Заключение. Реализация разработанных мероприятий по тепловой защите объекта исследования и использованию энергоэффективных инженерных решений позволит достигнуть следующих результатов: повысить потребительское качество зданий, довести параметры внутреннего микроклимата до нормативной величины; значительно продлить срок службы ограждающих конструкций, обеспечить экономию расхода энергоресурсов на теплоснабжение за счет снижения трансмиссионных и фильтрационных теплопотерь и рационального расхода тепла с использованием тепловых аккумуляторов; сократить объем вредных выбросов продуктов сгорания в атмосферу за счет отключения источника тепла на время использования аккумулированной теплоты.

Ключевые слова: энергоаудит; тепловая санация; тепловой режим; тепловые аккумуляторы; потребительское качество; энергетическая эффективность.

© Умеренков Е.В., Умеренкова Э.В., Семичева Н.Е., Насонова А.А., Сазонова А.А., 2019

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2019; 23(2): 85-96

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

Для цитирования: Исследование теплового режима зданий ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» с разработкой мероприятий по повышению энергетической эффективности / Е.В. Умеренков, Э.В. Умеренкова, Н.Е. Семичева, А.А. Насонова, А.А. Сазонова // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 85-96. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-85-96.

UDC 628.81

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-85-96

The Study of Buildings' Thermal Mode with the Development of Actions for Power Efficiency Increase (on the Example of "Southwest State University")

Evgeny V. Umerenkov ✉, Elina V. Umerenkova, Natalia E. Semicheva,
Aleksandra A. Nasonova, Anastasia A. Sazonova

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

✉ e-mail: tgv-kstu6@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of the study is to carry out an applied research of buildings' thermal mode of Southwest state university on the basis of energy audit results and development of scientific and technical actions of thermal sanitation including search of expedient options of enclosing structures' warming and increase of heat supply system by thermal energy accumulation.

Methods. Heat power indicators of research objects and their comparison with standards were defined on the basis of energy audit results. It was done for the research objective achievement. Possible options of bringing thermal resistance of enclosing structures to required values were analysed taking into account minimization of capital expenditure. Inclusion of warmth accumulators on transition phase in the system of heat consumption is offered. It is used for removal of heat superfluous at night from heating system and its rational use for economy consumption of thermal energy. Saved thermal energy is supposed to be used for hot water supply (HWS) in the afternoon. Integration of thermal accumulators allows to smooth unevenness of HWS loadings for decentralized heat supply system. Shutdown of the main source (heat generator) on usage time of accumulated warmth gives positive ecological effect, i.e. provides reduction of greenhouse gases emissions. Ways in efficiency increase of warmth faze changing accumulator of housing type is offered to use.

Results. Development of technical actions for ensuring power efficiency and increase in consumer's quality of research objects is a result of the carried-out research.

Conclusion. Implementation of developed actions for thermal protection and the use of energy efficient engineering actions allows to achieve the following results: to increase consumer quality of buildings, to bring parameters of an internal microclimate to standards; to prolong service life of enclosing structures considerably, to provide consumption economy of energy resources on heat supply due to decrease in transmission and filtration heat losses and rational heat expenses with the use of thermal storage devices; to reduce the volume of harmful emissions of combustion products due to shutdown of heat source by usage time of accumulated warmth.

Keywords: energy audit; thermal sanitation; thermal mode; thermal accumulators; consumer quality; power efficiency.

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

For citation: Umerenkov E. V., Umerenkova E. V., Semicheva N. E., Nasonova A. A., Sazonova A. A. The Study of Buildings' Thermal Mode with the Development of Actions for Power Efficiency Increase (on the Example of "Southwest State University"). *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(2): 85-96 (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-85-96.

Введение

Неуклонный рост цен на энергоносители определяет актуальность проблемы энергосбережения во всех сферах потребления тепловой энергии. Вопрос обеспечения энергоэффективности вновь строящихся объектов, в том числе, бюджетной сфере, четко определен требованиями [1-3]. Однако не стоит забывать, что фонд зданий и сооружений старой застройки составляет немалую величину отапливаемых квадратных метров и решение вопроса его тепловой защиты не только повысит потребительское качество существующих зданий, но и значительно снизит затраты энергоресурсов [4], что особенно актуально в бюджетной сфере.

Очевидно, что принимать решения необходимо, учитывая как капитальные затраты на реализацию данных мероприятий, так и ожидаемое снижение эксплуатационных издержек потребителя.

Следовательно, вопросы реконструкции и капитального ремонта производственного фонда в последнее время стали такими же актуальными, как и вопросы строительства.

Учитывая, что срок эксплуатации конструктивных элементов кирпичных и крупнопанельных зданий составляет

75–100 лет, эти здания, возведенные до 1995 года, пока не исчерпали свой расчетный ресурс с точки зрения физического износа, но энергетические затраты превышают в 2,5–3 раза существующие нормативы.

Низкое качество теплозащиты отапливаемых зданий приводит к недопустимому уровню теплопотерь через ограждающие конструкции и перерасходу тепла на отопление.

Как показывает опыт, значительная, а в конкретных условиях – большая доля эффекта энергосбережения может быть получена при модернизации существующих и разработке новых инженерных систем и оборудования при эксплуатации объектов.

Эффективное использование тепловой энергии при эксплуатации систем теплоснабжения невозможно без решения проблемы аккумулирования теплоты [5-7]. Повышение эффективности теплогенерирующих установок за счет утилизации теплоты, ее аккумулирования и использования в системах теплоснабжения как "пиковой" тепловой нагрузки является актуальной проблемой, решение которой позволит создать новые технические установки по аккумулированию теплоты.

На настоящий момент, внедрение новых технологий в области теплопотребления и современного энергосберегающего оборудования решает не только задачи сокращения потребления традиционных источников энергии, но и, что не менее важно, экологические проблемы. Загрязнение атмосферы вредными веществами, такие как оксид углерода, диоксид серы, оксиды азота, углеводороды, пылевые выбросы, тепловое загрязнение среды вызывается потреблением энергии как таковым.

Т.о., если рассматривать вопросы санации с точки зрения анализа возможностей снижения потерь тепла через ограждающие конструкции и совершенствования систем обеспечения микроклимата, можно выделить три основных задачи для ее реализации:

- получение и анализ фактических данных о состоянии ограждающих конструкций здания и определение потенциала энергосбережения;
- выбор технологического решения для пассивных энергосберегающих мероприятий и инженерно-технического решения для реализации активных энергосберегающих мероприятий;
- выбор конкретного материала и инженерного оборудования.

Материалы и методы решения задачи

В соответствии с принятой в [8] терминологией, исходными показателями потребительского качества здания выступают качество микроклимата и удельный расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию.

Анализ параметров теплового режима зданий показал, что даже при условии соблюдения теплоснабжающей организацией температурного графика подачи тепла при расчетных условиях эксплуатации системы отопления, в отапливаемом здании температура внутренней поверхности наружных ограждений при расчетных условиях не удовлетворяет требованиям [3] к ограничению минимальной температуры и недопущению конденсации влаги на внутренней поверхности ограждающих конструкций в холодный период года, а удельная теплозащитная характеристика здания ($k_{06}=0,32 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$) превышает нормируемое значение ($k_{06}^{\text{TP}}=0,16 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$), что не соответствует комплексным требованиям к теплозащитной оболочке. Следовательно, комплекс объектов недвижимости ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», включающий здание главного корпуса с аудиторно-зальным блоком и здание девятиэтажного общежития, нуждается в ряде мер по доведению его теплоэнергетических характеристик до нормативной величины.

Авторами настоящей статьи была сделана попытка проанализировать отечественный рынок теплоизоляционных материалов, с точки зрения минимизации капитальных издержек при реализации мероприятий по тепловой санации ограждений.

Обобщенная информация по техническим и стоимостным характеристикам наиболее востребованным теплоизоляционным материалам представлена в таблице 1.

Таблица 1

Технические и стоимостные характеристики теплоизоляционных материалов

Теплоизоляционный материал	Фирма	Цена за 1 куб.м., руб.	Плотность, г кг/м ³	Паропроницаемость, мг/м ² Па	Теплопроводность, Вт/м ²⁰ С	Водопоглощение по объему %, не более	Влажность по массе, % не более	Объем в упаковке, м3	Горючесть	Вид утеплителя
Izovol Л-35	IZOVOL	2083	35	0,3	0,035	1,5	0,5	0,24	НГ	Базальтовая вата
Технофас коттедж	ТехноНИКОЛЬ	6125	95	0,3	0,041	1,5	0,5	0,216	НГ	Базальтовая вата
Технолайт экстра	ТехноНИКОЛЬ	2817	30	0,3	0,041	1,5	0,5	0,43	НГ	Базальтовая вата
Технолайт оптима	ТехноНИКОЛЬ	3069	34	0,3	0,041	1,5	0,5	0,43	НГ	Базальтовая вата
Роклайт	ТехноНИКОЛЬ	2231	30	0,3	0,041	2	0,5	0,43	НГ	Базальтовая вата
URSA Terra 34 PN Pro	URSA	1279	60	0,384	0,038	1	0,5	0,915	НГ	Базальтовая вата
ISOVER Оптимал	ISOVER	1996	35	0,3	0,04	1	0,5	0,24	НГ	Базальтовая вата
ISOVER Стандарт	ISOVER	2263	40	0,3	0,039	1	0,5	0,24	НГ	Базальтовая вата
Rockwool Лайт Батс Экстра	Rockwool	2500	40	0,3	0,04	1	0,5	0,24	НГ	Базальтовая вата
Greenguard Универсал	ТехноНИКОЛЬ	2084	35	0,3	0,041	1	0,5	0,24	НГ	Базальтовая вата
XPS Техно-плекс	ТехноНИКОЛЬ	4164	30	0,014	0,034	0,4	-	0,21	Г4	Экструзионный пенополистирол
URSA XPS-N-III-L Г4	URSA	1707	35	0,004	0,032	0,3	-	0,247	Г4	Экструзионный пенополистирол
Пеноплекс Комфорт	Пеноплекс	1740	от 20	0,005	0,032	0,4	-	0,243	Г4	Экструзионный пенополистирол

Не ставя перед собой задачи анализировать причины ценового разброса утеплителей, а имея в виду только примерно аналогичную теплотехническую эффективность, устойчивость к влаге, плотность и класс горючести, авторы статьи попытались оценить затратность

теплозащиты при их использовании на примере конкретного объекта.

Удельные капитальные вложения на разный уровень теплозащиты при использовании различных утеплителей представлены в таблице 2.

Таблица 2

Затраты на утепление, приведенные к единице отопливаемой площади

Вид утеплителя	Затраты на утепление, руб/м ²	
	50 мм	100 мм
Izovol Л-35	228,18	452,21
Технофас коттедж	669,63	1328,27
Технолайт экстра	313,04	615,98
Технолайт оптимал	341,08	671,15
Роклайт	247,96	487,92
URSA Terra 34 PN Pro	145,62	281,54
ISOVER Оптимал	218,6	433,22
ISOVER Стандарт	247,81	491,1
Rockwool Лайт Баттс Экстра	273,82	533,61
Greenguard Универсал	228,18	452,21
XPS Техноплекс	445,01	986,13
URSA XPS-N-III-L Г4	531,04	1136,95
Пеноплекс Комфорт	539,47	1079,91

Целесообразным конструктивным решением утепления наружных стен, учитывающим теплофизические свойства и конструкции панелей существующих стен, отделки их лицевой стороны, технических и материальных возможностей региона, является на штукатурная система утепления фасада с гибкими крепежными элементами. Для здания главного учебного корпуса, в силу ленточного остекления, представляют интерес разработки [9,10].

В связи с отсутствием системы регулирования суточного изменения параметров теплоносителя, что возможно для общественных зданий (главный учебный корпус) с непостоянным графиком использования, возможно включение в систему теплоснабжения устройства

для снижения параметров теплоносителя, что позволит снижать температуру в помещениях в ночные часы. Для снятия избыточного в ночное время количества тепла (система отопления от централизованного источника) и его рационального использования, с целью экономии потребления тепловой энергии, представляется возможным внедрение аккумуляторов теплоты. В дневное время накопленную тепловую энергию предполагается использовать для нужд ГВС.

Для децентрализованной системы теплоснабжения (здание общежития) интеграция тепловых аккумуляторов позволит сгладить неравномерность нагрузок ГВС, а отключение основного источника (теплогенератора) на время использования аккумулированной теплоты даёт положительный экологический эф-

фект, т.е. обеспечивает сокращение выбросов парниковых газов [11].

Использование тепловых аккумуляторов как правило заставляет решать ряд проблем, связанных с их массогабаритными характеристиками. В работах [12,13] предлагается к использованию ряд способов повышения эффективности фазопереходного аккумулятора теплоты кожухотрубного типа.

Результаты и их обсуждение

Аналитический обзор отечественного рынка теплоизоляционных материалов с целью определения стоимости увеличения теплозащиты несветопрозрачных ограждающих конструкций показал, что обеспечение теплозащиты, в зависимости от выбранного материала может обойтись от 145 руб на квадратный метр отапливаемой площади до 670 руб. при обеспечении нормативного термического сопротивления. Повышение же уровня теплозащиты приведет к существенному увеличению капитальных вложений, но незначительно сократит эксплуатационные затраты.

При реализации заявленной схемы регулирования с использованием тепловых аккумуляторов более целесообразным представляется использование фазопереходных аккумуляторов теплоты, поскольку процесс зарядки и разрядки такого аккумулятора пролонгирован во времени.

Принципиальная схема включения фазопереходных аккумуляторов тепло-

ты в систему теплоснабжения представлена на рисунке 1.

Возможный вариант включения фазопереходного аккумулятора теплоты в систему децентрализованного теплоснабжения (рис. 2) предлагается в [14].

Секционирование аккумулятора (рис.3) уменьшает массу теплоаккумулирующего материала (ТАМа) по полезной массе на 13,43%.

С целью уменьшения вертикальных размеров аккумулятора, а также исключения балластной части ТАМа предлагается конструкция аккумулятора без общего корпуса (рис.4).

Выводы

Реализация разработанных мероприятий позволит достигнуть следующих результатов:

- повысить потребительское качество зданий, довести параметры внутреннего микроклимата до нормативной величины;
- значительно продлить срок службы ограждающих конструкций, обеспечить экономию расхода энергоресурсов на теплоснабжение за счет снижения трансмиссионных и фильтрационных теплопотерь и рационального расхода тепла с использованием тепловых аккумуляторов;
- сократить объем вредных выбросов продуктов сгорания в атмосферу за счет отключения источника тепла на время использования аккумулированной теплоты.

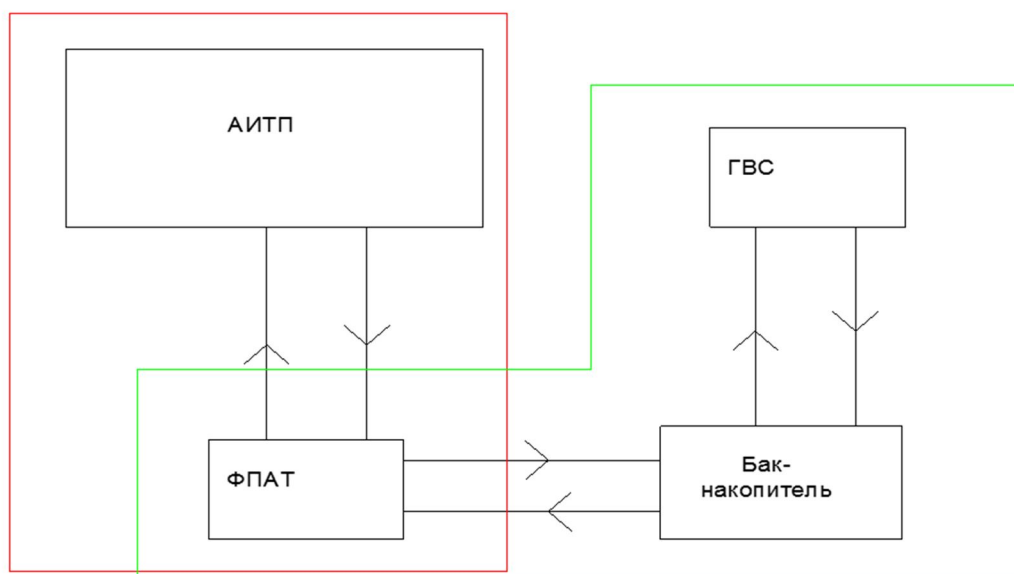


Рис. 1. Принципиальная схема включения фазопереходного аккумулятора теплоты в централизованную систему теплоснабжения

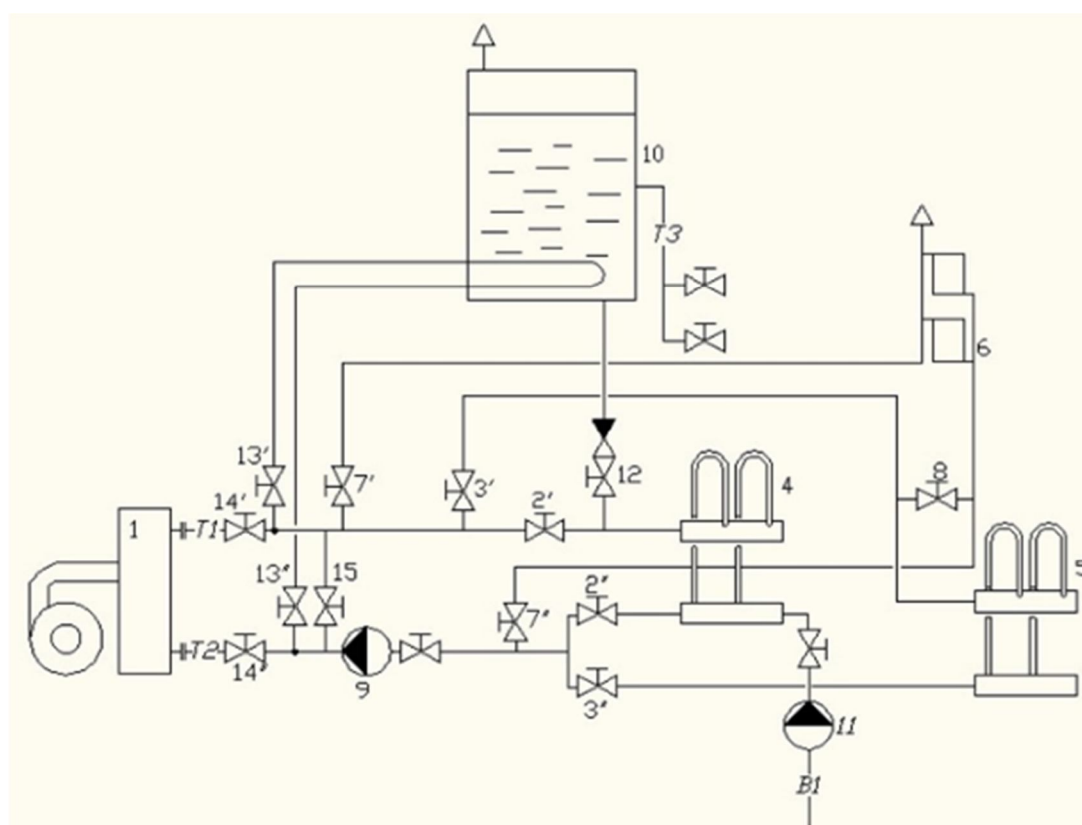


Рис. 2. Принципиальная схема децентрализованного теплоснабжения с аккумулярованием теплоты:
 1-котел; 4,5 – аккумуляторы теплоты; 6 – система отопления; 9 – циркуляционный насос;
 10 – расходный бак горячего водоснабжения; 11 – подкачивающий насос;
 2' и 2'', 3' и 3'', 7' и 7'', 8, 12, 13' и 13'', 14' и 14'', 15 – запорно-регулирующая арматура

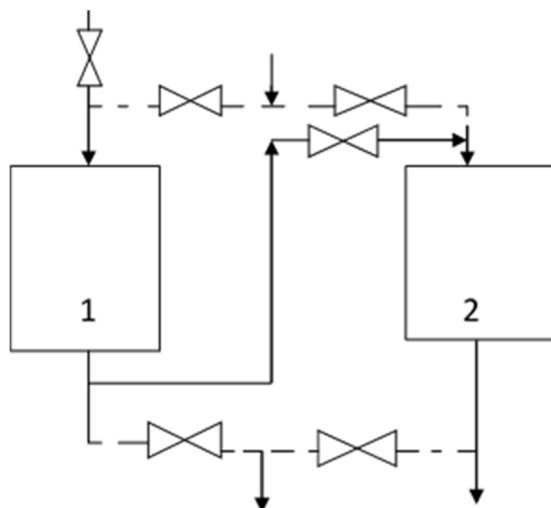


Рис. 3. Двухсекционный аккумулятор: --- - обвязка секций при зарядке АТ

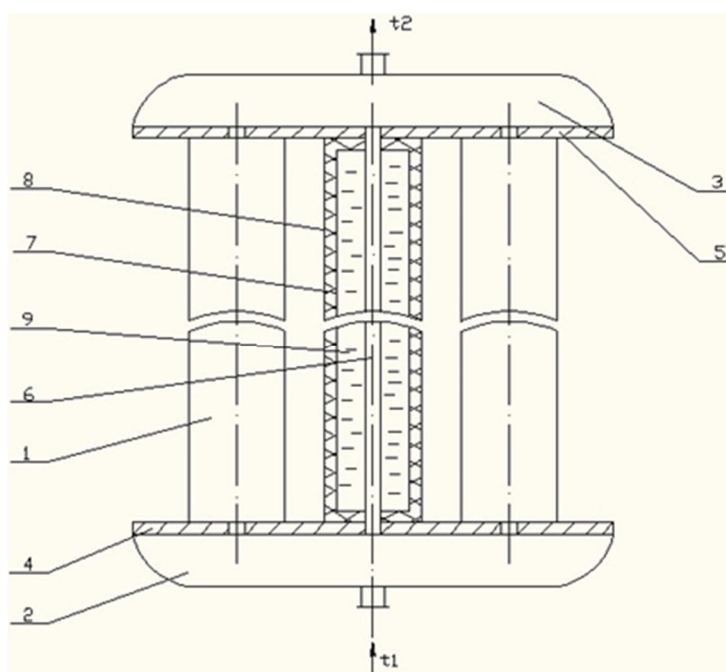


Рис. 4. Конструкция безкорпусного аккумулятора теплоты: 1 – теплоаккумулирующие ячейки; 2, 3 – нижняя и верхняя сборные камеры (коллекторы); 4, 5 – нижняя и верхняя трубные доски; 6 – теплообменная трубка; 7 – корпус; 8 – тепловая изоляция; 9 – ТАМ

Мероприятия по обеспечению тепловой санации зданий, разумеется, требуют значительных капитальных вложений, однако целесообразность и актуальность их внедрения определяется в первую очередь необходимостью довести потребительское качество зданий старой застройки до нормативных пока-

зателей. Что же касается экономической эффективности, то при настоящем уровне цен на энергоноситель и сохраняющихся тенденциях к его росту, будет снижаться и срок окупаемости данных мероприятий за счет снижения потребления тепла.

Список литературы

1. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от 23.11.2009 N 261-ФЗ (ред. от 29.07.2017) " (с изменениями и дополнениями, вступающими в силу с 01.01.2018). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. ГОСТ 30494-96. Межгосударственный стандарт. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях / Госстрой России, ГУП ЦПП. М., 1999.
3. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. М., 2012. 95 с.
4. Вопросы тепловой санации зданий существующего жилого фонда / Н.С. Кобелев, А.М. Крыгина, Э.В. Котенко, Е.В. Умеренков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 5-2 (38). С. 340-344.
5. Левенберг В. А., Ткач М. П., Гольстрем В. А. Аккумулирование тепла. Киев: Техника, 1991. 112 с.
6. Камимото Абе Е., Канари К. Теплообменники в накопителях скрытой тепловой энергии // Solar Energy. 1980. Vol. 24. P. 581-622.
7. Бекман Г., Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии: [пер. с англ.] М.: Мир, 1987.
8. Табунщиков Ю.А. Потребительские качества здания. М.: АВОК, 2004, №4.
9. Пат. России № 2464390 МПК E04B 1/80. Панель для дополнительной теплоизоляции стен // Емельянов А.С, Кобелев Н.С., Кобелев В.Н. [и др.].
10. Пат. России № 126725 МПК E04B 1/80. Панель для дополнительной теплоизоляции стен // Бюл. №25 / Емельянов А.С, Кобелев Н.С., Кобелев В.Н. [и др.]
11. Котенко Э.В., Умеренков Е.В., Котенко В.И. Экологические аспекты использования аккумуляторов теплоты // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2013. № 3. С. 15-18.
12. Умеренков Е. В., Котенко Э. В. Секционирование кожухотрубного аккумулятора тепла на фазовом переходе как способ повышения его эффективности // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. № 2, ч 2. С. 39-43.
13. Умеренкова Э.В., Умеренков Е.В., Котенко В.И. Конструкция бескорпусного аккумулятора теплоты // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2015. № 4(61), ч 2. С. 41-45.
14. Умеренков Е.В. Разработка аккумуляторов теплоты на фазовом переходе для систем теплоснабжения: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2013. 16 с.

Поступила в редакцию 05.02.2019

Подписана в печать 04.03.2019

References

1. Federal Law of 23.11.2009 N 261-FZ (as amended on 07/29/2017) "On energy saving and on increasing energy efficiency and on introducing changes to certain legislative acts of the Russian Federation" (with amendments and additions that come into force on 01.01.2018). Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy "Konsul'tantPlyus" (In Russ.).
2. GOST 30494-96. Interstate standard. Residential and public buildings. The parameters of the microclimate in the premises. Moscow, 1999 (In Russ.).
3. SP 50.13330.2012. Thermal protection of buildings. Moscow, 2012, 95 p. (In Russ.).
4. Kobelev N.S., Krygina A.M., Kotenko E.V., Umerenkov E.V. Voprosy teplovoi sanatsii zdanii sushchestvuyushchego zhilogo fonda [Issues of thermal sanitation of buildings of the existing housing stock]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. = *Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 5-2 (38), pp. 340-344 (In Russ.).
5. Levenberg V. A., Tkach M. P., Golstrem V. A. Heat accumulation. Kiev, Tekhnika Publ., 1991, 112 p. (In Russ.).
6. Kamimoto Abe E., Canari K. Heat exchangers in latent thermal energy storage devices. *Solar Energy*, 1980, vol. 24, p. 581-622.
7. Beckman G, Gilly P. Thermal energy storage: Trans. from English. Moscow, Mir Publ., 1987.
8. Tabunshchikov Yu.A. Potrebitel'skie kachestva zdaniya [Consumer quality of the building]. Moscow, ABOK Publ., 2004, no. 4 (In Russ.).
9. Patent of Russia No. 2464390 IPC E04B 1/80. Panel for additional thermal insulation of walls. Emelyanov A.S., Kobelev N.S., Kobelev V.N. [and etc.].
10. Patent of Russia No. 126725 IPC E04B 1/80. Panel for additional thermal insulation of walls. Emelyanov A.S., Kobelev N.S., Kobelev V.N. [and etc.]. Bull. No. 25.
11. Kotenko E.V., Umerenkov E.V., Kotenko V.I. Ekologicheskie aspekty ispol'zovaniya akkumulyatorov teploty [Environmental aspects of the use of heat accumulators]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series Engineering and Technologies*, 2013, no. 3. p. 15-18 (In Russ.).
12. Umerenkov E. V., Kotenko E. V. Sektsionirovanie kozhukhotrubnogo akkumulyatora tepla na fazovom perekhode kak sposob povysheniya ego effektivnosti [Sectioning a shell-and-tube heat accumulator at a phase transition as a way to increase its efficiency]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series Engineering and Technologies*. 2012, no. 2, pt. 2, pp. 39-43 (In Russ.).
13. Umerenkova E.V., Umerenkov E.V., Kotenko V.I. Konstruktsiya beskorpusnogo akkumulyatora teploty [The design of an unpackaged heat accumulator]. *Izvestiya Yugo-*

Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series Engineering and Technologies. 2015, no. 4 (61). pt. 2, pp. 41-45 (In Russ.).

14. Umerenkov E.V. Development of heat accumulators at the phase transition for heating systems. Diss. cand. tech. sciences. Voronezh, 2013, 16 p. (In Russ.)

Received 05.02.2019

Accepted 04.03.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Умеренков Евгений Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоводоснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tgk-kstu6@yandex.ru

Evgeny V. Umerenkov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Heat, Gas and Water Supply Department, Kursk, Russian Federation
e-mail: tgk-kstu6@yandex.ru

Умеренкова Элина Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоводоснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tgk-kstu6@yandex.ru

Elina V. Umerenkova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Heat, Gas and Water Supply Department, Kursk, Russian Federation
e-mail: tgk-kstu6@yandex.ru

Семичева Наталья Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент, завкафедрой теплогазоводоснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tgk-kstu6@yandex.ru

Natalia E. Semicheva, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Heat, Gas and Water Supply and Ventilation department, Kursk, Russian Federation
e-mail: tgk-kstu6@yandex.ru

Насонова Александра Артемовна, магистрант кафедры теплогазоводоснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tgk-kstu6@yandex.ru

Alexandra A. Nasonova, Master. Heat, Gas and Water Supply Department, Kursk, Russian Federation
e-mail: tgk-kstu6@yandex.ru

Сазонова Анастасия Алексеевна, магистрант кафедры теплогазоводоснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tgk-kstu6@yandex.ru

Anastasia A. Sazonova, Master, Heat, Gas and Water Supply Department, Kursk, Russian Federation
e-mail: tgk-kstu6@yandex.ru

УДК 681.5.015

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-97-108

Идентификация момента инерции якоря двигателя постоянного тока и нагрузки в экспериментальной вибрационной установке для исследования хаотической динамики

В.Г. Рубанов ✉, Д.А. Бушуев, Е.М. Паращук, А. К. Трикула

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46

✉ e-mail: rubanov.vg@bstu.ru

Резюме

Цель исследования. Статья посвящена разработке и апробации методики оценки параметров моментов инерции якоря двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ) и его нагрузки, используемых в лабораторной вибрационной установке для исследования хаотической динамики.

Методы. Представлена математическая модель ДПТ НВ и описание методики для оценки величины момента инерции его якоря с нагрузкой в результате параметрической идентификации на основе аппроксимации проинтегрированной кривой разгона силы тока и выполнения спектрального анализа. Проведено совместное моделирование динамики электродвигателя Махон RE25 с электрической частью, реализованной в системе Matlab Simulink и механической, построенной в среде MSC Adams, и на основе результатов машинного эксперимента проверена работоспособность методики параметрической идентификации.

Результаты. Представлена структура и общий вид информационно-измерительной системы лабораторной вибрационной установки для исследования хаотической динамики на основе модуля ввода/вывода NI USB-6009. Приведены и проанализированы кривые разгона и амплитудные спектры силы тока, полученные в ходе проведения натурного эксперимента по определению моментов инерции якоря двигателя Махон RE25 и дебалансов. Произведен расчет значений моментов инерции якоря и дебаланса по предлагаемой методике, а также относительных погрешностей по сравнению с паспортным значением.

Заключение. В результате проведения серии параллельных экспериментов установлено, что опыты являются воспроизводимыми согласно критерию Кохрена, а погрешность определения момента инерции якоря ДПТ не превышает 5 %, поэтому ее можно также использовать для расчетов с достаточной точностью величин моментов инерции дебалансов.

Ключевые слова: двигатель постоянного тока с независимым возбуждением; параметрическая идентификация; момент инерции; вибрационная система; метод Пасека; Matlab.

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта Госзадания №2.1396.2017/4.6.

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

Для цитирования: Идентификация момента инерции якоря двигателя постоянного тока и нагрузки в экспериментальной вибрационной установке для исследования хаотической динамики / В.Г. Рубанов, Д.А. Бушуев, Е.М. Парашук, А. К. Трикула // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 97-108. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-97-108.

UDC 681.5.015

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-97-108

Identification of Anchor Inertia Motor Moment of Direct Current and Loading in Experimental Vibration Installation for Chaotic Dynamics Study

Vasiliy G. Rubanov ✉, Dmitriy A. Bushuev, Elena M. Parashchuk,
Andrei K. Trikula

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

✉ e-mail: rubanov.vg@bstu.ru

Abstract

Purpose of research. The article is devoted to development and approbation of parameters' assessment technique of anchor inertia moments of direct current motor with an independent excitation (DCM IE) and its loadings used in laboratory vibration installation for chaotic dynamics research.

Methods. The DCM IE mathematical model and technique description for assessment of anchor inertia moment with loading as a result of parametrical identification on the basis of approximation integrated curve of current runaway and implementation of spectral analysis is described in the article. Joint dynamics modeling of Maxon RE25 electric motor with electric and mechanical part was done in Matlab Simulink system. Mechanical part was constructed in MSC Adams. Technique operability of parametrical identification was checked on the basis of machine experiment results.

Results. Structure and general view of information and measuring system of laboratory vibration installation for chaotic dynamics research on the basis of input-output NI USB-6009 module is presented. Dispersal curves and an amplitude range of current received during experiment for definition of anchor inertia moments of Maxon RE25 engine and debalances are analysed. Calculation of anchor inertia moments and debalances are made according to an offered technique. Calculation of relative errors in comparison with passport value is also made.

Conclusion. According to the results of carried out parallel experiments it is found out that experiments can be made according to Kokhren's criterion. And the error of DCM anchor inertia moments definition is no larger than 5%. Therefore it can also be used for calculations with sufficient accuracy of debalances inertia moments.

Keywords: direct current motor with an independent excitation; parametrical identification; inertia moment; vibration system; Paseck's method; Matlab.

Acknowledgements: Researches are made with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the Goszadaniya No. 2.1396.2017/4.6 project.

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

For citation: Rubanov V. G., Bushuev D. A., Parashchuk E. M., Trikola A. K. Identification of Anchor Inertia Motor Moment of Direct Current and Loading in Experimental Vibration Installation for Chaotic Dynamics Study *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(1): 97-108 (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-97-108.

Введение

Двигатели постоянного тока (ДПТ) нашли широкое применение как в промышленности, так и в лабораторном оборудовании. Их отличает ряд преимуществ, которые оказываются важными при создании сложных электромеханических систем: более высокий КПД, чем в случае с двигателями переменного тока, возможность плавной и точной регулировки частоты вращения в широких пределах, малая инерционность.

При практическом исследовании линейной и нелинейной динамики электромеханических систем, в которых используются двигатели постоянного тока, возникают задачи определения параметров их математических моделей. Поскольку некоторые паспортные значения для ряда двигателей отсутствуют, либо в процессе продолжительного функционирования могут изменяться, то возникает необходимость проведения экспериментальной идентификации.

Одной из таких задач является разработка экспериментальной вибрационной установки с релейным управлением, которая должна соответствовать математической модели, представленной в [1].

Важными параметрами рассматриваемой электромеханической системы, влияющими на динамику, которые требуется уточнить экспериментальным путем в результате идентификации, яв-

ляются моменты инерции якоря и инерционной нагрузки или дебаланса. Для оценки параметров электродвигателей обычно используют офлайн и онлайн методы идентификации [2]. Онлайн методы на основе наблюдателей состояния, фильтров Калмана, нейронных сетей и т.п. обычно применяются при диагностике неисправностей и в системах защиты ДПТ [3] и, как правило, сложны в настройке. При офлайн идентификации регистрируются реакции на подаваемые тестовые сигналы и затем анализируются.

Большинство существующих методик ориентированы на регистрацию изменения скорости вращения якоря при изменении напряжения управления и последующим анализом с использованием рекуррентного метода наименьших квадратов (РМНК) [4], метода моментов [5] и др. [6]. При этом, как правило, анализируются кривые разгона [7], либо импульсные характеристики [8]. Однако для этого требуется наличие датчиков скорости вращения, что влечет за собой усложнение конструкции, увеличение габаритов и массы электромеханической системы, а это является критичным для исследуемой лабораторной установки.

В работе [9] описан динамический метод Пасека, используемый для идентификации параметров высокопроизво-

дательных ДПТ по кривой разгона – реакции изменения тока якоря двигателя на подачу ступенчатого напряжения питания. При его реализации измеряются значения времени возникновения и величины тока якоря в момент подачи воздействия, при максимальном значении тока, в момент, соответствующий удвоенному времени появления максимума, а также ток и скорость вращения в установившемся режиме и далее по соответствующим формулам определяются параметры аппроксимирующей математической модели ДПТ. Модифицированный метод Пасека, учитывающий вязкое трение, описан в работе [10]. Недостатком метода Пасека является высокая чувствительность к шумам, возникающим в процессе коммутации [2].

Целью данной работы является разработка и апробация методики оценки основных параметров ДПТ с независимым возбуждением и нагрузки на основе информации, получаемой только с датчика тока, в лабораторной установке для исследования хаотической динамики, поскольку от них зависит степень соответствия теоретических и экспериментальных результатов при анализе бифуркационных явлений.

Материалы и методы решения задачи

Математическую модель, описывающую линейную динамику двигателя постоянного тока независимого возбуждения или с возбуждением от постоянных магнитов при управлении скоростью вращения изменением напряжения якорной цепи, можно пред-

ставить в виде следующей структурной схемы (рис.1), на которой U_y – напряжение управления, В; I_a – ток в якорной цепи двигателя; R_a – сопротивление якорной цепи, равное сумме сопротивлений якорных обмоток двигателя и выходного сопротивления усилителя, Ом; L_a – сумма индуктивностей якорной цепи двигателя и выходной цепи усилителя, Гн; E_d – обратная ЭДС двигателя; M_c , M_d , M – момент сопротивления, движущий момент и результирующий момент, приложенный к якорю, Н·м, соответственно; C_e – коэффициент момента, Н·м/А; C_w – коэффициент скорости (противо ЭДС), В·с/рад; ω – частота вращения двигателя, рад/с; J – момент инерции якоря, Н·м²; B – коэффициент вязкого трения; s – оператор Лапласа.

Выходным сигналом модели, который можно непосредственно измерить в лабораторной установке при помощи датчиков Холла является ток якорной цепи. В этом случае при отсутствии момента сопротивления M_c и вязкого трения B передаточная функция по управляющему воздействию с учетом преобразований запишется следующим образом:

$$W_y(s) = \frac{I_a(s)}{U_y(s)} = \frac{k_I s}{(T_m T_e s^2 + T_m s + 1)}, \quad (1)$$

где $T_m = \frac{J R_a}{C_w C_e}$ – механическая постоянная времени двигателя; $T_e = \frac{L_a}{R_a}$ – электрическая постоянная времени двигателя; $k_I = \frac{J}{C_w C_e}$ – коэффициент передачи по току.

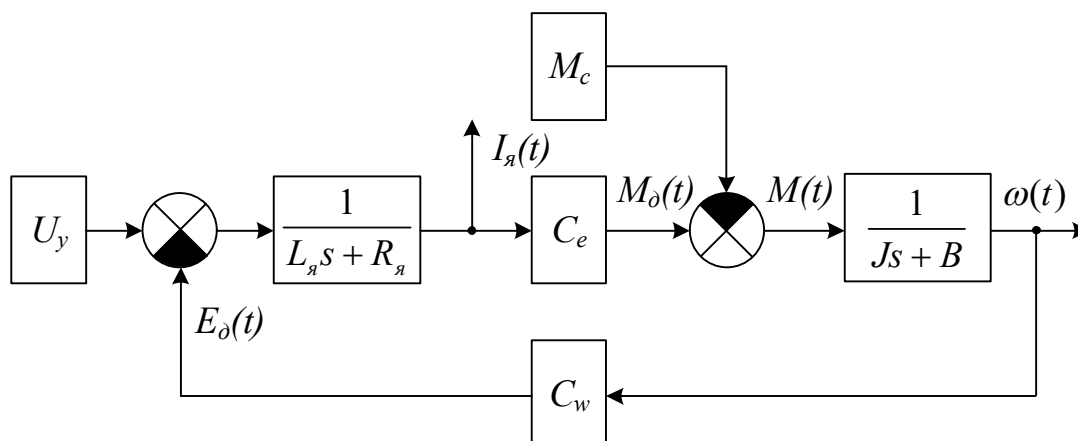


Рис. 1. Структурная схема двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

В широко распространённых методах идентификации, например в методе Симою, используется структура объекта управления, представленная в следующем виде

$$W_o(s) = \frac{b_m \cdot s^m + \dots + b_1 \cdot s + 1}{a_n \cdot s^n + \dots + a_1 \cdot s + 1} = \frac{B(s)}{A(s)}. \quad (2)$$

Для перехода к данной структуре в передаточную функцию (1), описывающую динамику ДПТ НВ, и для фильтрации шумов с датчика необходимо добавить интегрирующее звено. Таким образом, выходным параметром двигателя будет являться проинтегрированное значение измеренного тока в обмотке якоря.

В таком случае в соответствии с выражением (1) выберем колебательное динамическое звено в качестве аппроксимирующей передаточной функции:

$$W_o(s) = \frac{k_o}{T_o^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_o \cdot s + 1}, \quad (3)$$

где k_o – коэффициент передачи; T_o – постоянная времени; ξ – степень затухания.

Поскольку в любой электромеханической системе в той или иной степени присутствуют силы сопротивления, то

пренебрежение моментом сопротивления и коэффициентом трения согласно приведенной структуре (см. рис. 1) будет искажать искомые значения моментов инерции. С другой стороны, учет момента сопротивления в математической модели (1) приведет к несоответствию объекта управления структуре (3), используемой при идентификации.

Поэтому предлагается для определения механической постоянной времени $T_m = 2 \cdot \xi \cdot T_o$ воспользоваться моделью (1), не учитывающей момент сопротивления, но, при этом, для перехода к модели вида (3) интегрировать значение тока за вычетом усредненного значения тока в установившемся режиме, поскольку он обусловлен наличием сил сопротивления и нагрузки и при интегрировании вызывает постоянный рост выходного сигнала интегратора.

Определив значение механической постоянной времени T_m , момент инерции определяется следующим образом:

$$J = \frac{T_m C_w C_e}{R_я}. \quad (4)$$

Анализируя паспортные данные различных производителей видно, что для ряда двигателей приводятся сведения только о номинальных значениях напряжения U_n , тока якоря I_n и частоты вращения ω_n , а, в случае, если даны величины коэффициентов C_e и C_w , то они приблизительно равны единому электромагнитному коэффициенту $k_{ЭМ}$ [11] определяемому как

$$k_{ЭМ} = \frac{U_n - I_n R_{я}}{\omega_n}. \quad (5)$$

При отсутствии указанных номинальных значений в формулу (5) можно подставлять соответствующие величины напряжения питания U_y , усредненного установившегося значения тока I_y , и измеренного соответствующими приборами сопротивления якорной цепи $R_{я}$. Величину установившегося значения скорости вращения якоря ДПТ можно определить по спектральной характеристике токового сигнала при использовании быстрого преобразования Фурье, поскольку всплеск тока вследствие процесса коммутации происходит каждый раз, когда сегмент коллектора разрывает контакт со щеткой [12]. Таким образом, число текущих пиков тока на оборот равно удвоенному числу проводников коллектора N . При помощи быстрого преобразования Фурье определяется частота $f_{\max}$, соответствующая максимальной мощности в спектральной плотности токового сигнала, по которой скорость вращения якоря в установившемся режиме определяется следующим образом:

$$\omega_y = \frac{2\pi f_{\max}}{2N} = \frac{\pi f_{\max}}{N}. \quad (6)$$

Учитывая выражения (4)–(6), момент инерции якоря ДПТ может быть рассчитан по формуле

$$J = \frac{T_m N^2 (U_y - I_y R_{я})^2}{R_{я} (\pi f_{\max})^2}. \quad (7)$$

Располагая значением величины момента инерции J , можно по этой же методике определить момент инерции якоря с нагрузкой J_c , и затем при необходимости момент инерции дебаланса $J_L = J_c - J$.

Результаты и их обсуждение

Для проверки работоспособности метода проводился машинный эксперимент путем совместного моделирования динамики с использованием модели ДПТ НВ [13], в которой электрическая часть модели (см. рис. 1) рассчитывалась средствами Matlab Simulink, а механическая – в MSC Adams (рис. 2,а). Исследования производились с электродвигателем Махон RE 25, имеющим следующие паспортные параметры: $R_{я} = 2,18 \text{ Ом}$; $C_w = 0,02353 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$; $C_e = 23,5 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м/А}$; $J_0 = 1,08 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $L_{я} = 0,238 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$.

Кривая разгона двигателя, построенная по паспортным данным, при подаче скачком напряжения $U_y = 4 \text{ В}$ показана на рис. 2,б (кривая 1).

В результате интегрирования реакции тока на ступенчатое воздействие за вычетом тока холостого хода I_y и последующей идентификации при помощи метода площадей были опре-

делены следующие параметры аппроксимированного объекта управления, заданного выражением (2) $k_o = 1,94 \cdot 10^{-3}$; $T_o = 7,6 \cdot 10^{-4}$ с; $\xi = 2,79$. Как видно (рис. 2,б кривая 2) кривая разгона аппроксимированного объекта

совпадает с кривой разгона исследуемого ДПТ, при этом в соответствии с вычисленной постоянной времени $T_m = 4,251$ мс и, используя паспортные значения C_w , C_e , $R_{я}$, по формуле (4) был определен момент инерции $J = 1,08 \cdot 10^{-6}$ Н·м².

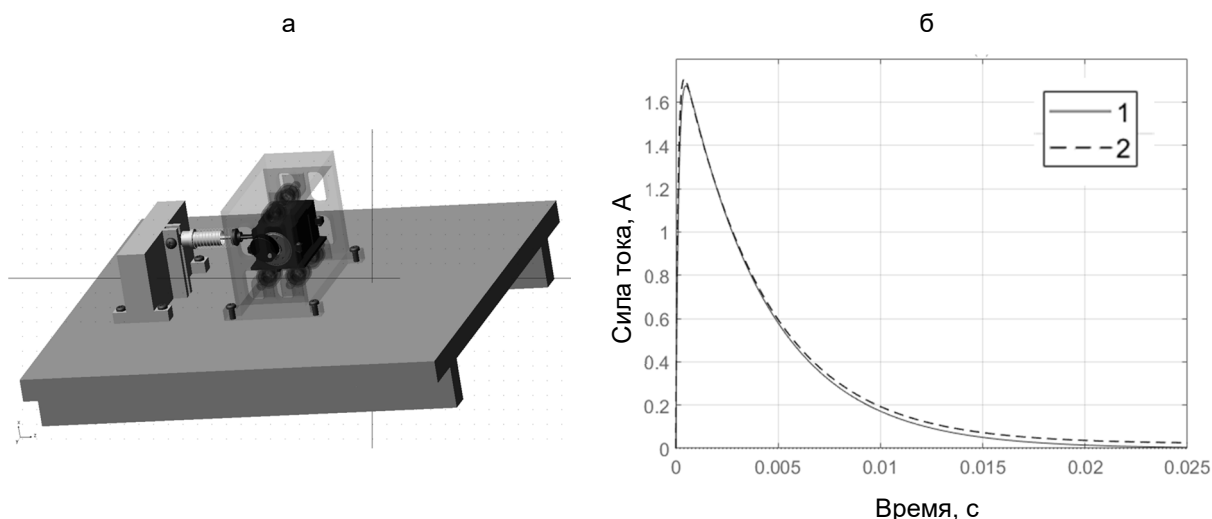


Рис. 2. Механическая часть модели лабораторной установки (а) и кривые разгона электродвигателя Махон RE25 (б): 1 – построенная по паспортным данным; 2 – полученная в результате идентификации

Представленная цифровая модель электродвигателя является упрощенной, поскольку в ней не учитываются нелинейные явления, имеющие место в реальных электромеханических системах, процесс коммутации и т.п. В лабораторной установке для исследования хаотической динамики с целью определения моментов инерции якоря двигателя и нагрузки реализована информационно-измерительная система, структура и внешний вид которой представлены на рис. 3.

В установке применяется ДПТ Махон RE 25, на вал которого монтируются различные дебалансы, момент инерции которых требуется определить по описанной выше мето-

дике. Для измерения сопротивления цепи якоря использовался измерительный прибор SANWA PC5000 с точностью измерения 0,01 Ом. Регистрация аналоговых сигналов осуществляется при помощи программного обеспечения NI DAQ и модуля NI USB 6009. С целью синхронизации регистрации поданного ступенчатого воздействия и реакции тока, а также для устранения дребезга, в качестве запускающего элемента выступает оптический концевой выключатель D, коммутирующий электромагнитное реле K1 с контактом K1.1. В качестве датчика тока ДТ использован преобразователь Холла LTS 6-NP. В среде Matlab осуществлялась обработка ре-

зультатов и идентификация. Для определения среднего значения тока и частоты вращения в установившемся режиме использован фильтр скользящего

среднего и быстрое преобразование Фурье соответственно. Проведено пять серий параллельных экспериментов для двигателя с нагрузкой и без.

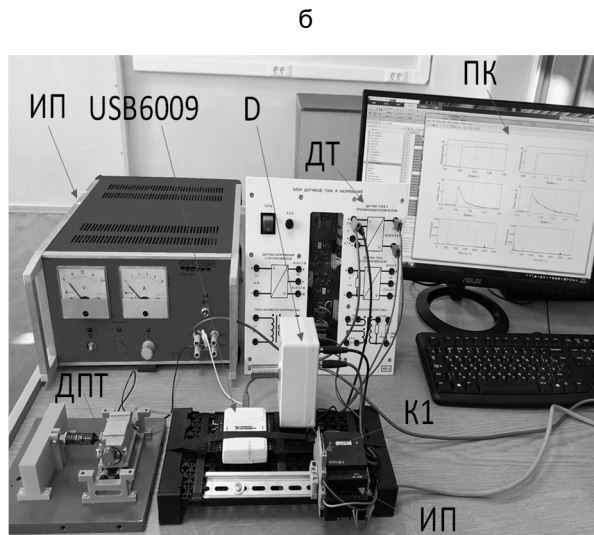
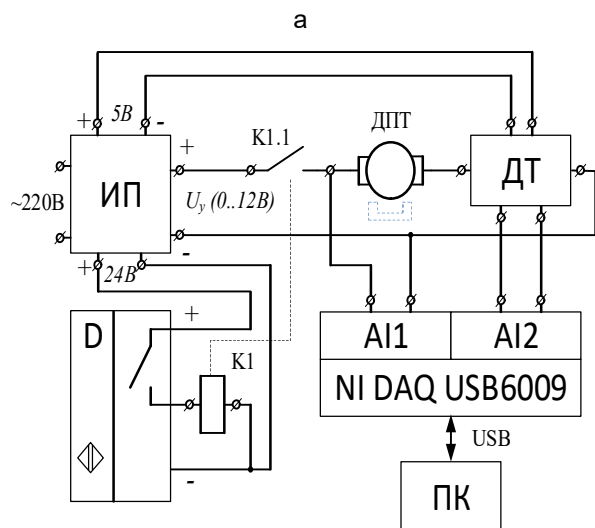


Рис. 3. Структура (а) и внешний вид (б) лабораторной установки для исследования хаотической динамики

Результаты одной из серий проведенных испытаний для ненагруженного электродвигателя и с дебалансом с массой $m_1=15$ грамм представлены на рис. 4.

Как видно по спектру (см. рис. 4) в токовом сигнале присутствуют наводки из сети питания с $f=50$ Гц, гармоника на частоте $f_{\max}$, соответствующая частоте коммутации, и высокочастотный шум, формируемый за счет модуля ввода/вывода USB-6009. Общий вид временных характеристик для ненагруженного ДПТ соответствует модельному эксперименту (см. рис. 3).

В процессе идентификации параметров ДПТ без механической нагрузки

определена постоянная времени $T_m=4,255$ мс и частота $f_{\max}=581,8$ Гц, а сопротивления якорной цепи $R_{\text{я}} = 2,2$ Ом. Момент инерции, рассчитанный по паспортным значениям C_w , C_e , по формуле (4), равен $J=1,061 \cdot 10^{-6}$, кг·м² (относительная ошибка $\delta = |J - J_0| / J \cdot 100\%$ по сравнению с паспортным значением момента инерции J_0 равна $\delta = 1,76\%$), а по формуле (7) – $J=1,072 \cdot 10^{-6}$, кг·м² ($\delta = 0,74\%$).

При наличии дебаланса с массой $m_1=15$ грамм $T_m=9,316$ мс и частота $f_{\max}=568,3$ Гц, откуда момент инерции двигателя с нагрузкой $J_c = 2,44 \cdot 10^{-6}$ кг·м², и соответственно, момент нагрузки $J_L=1,36 \cdot 10^{-6}$ кг·м².

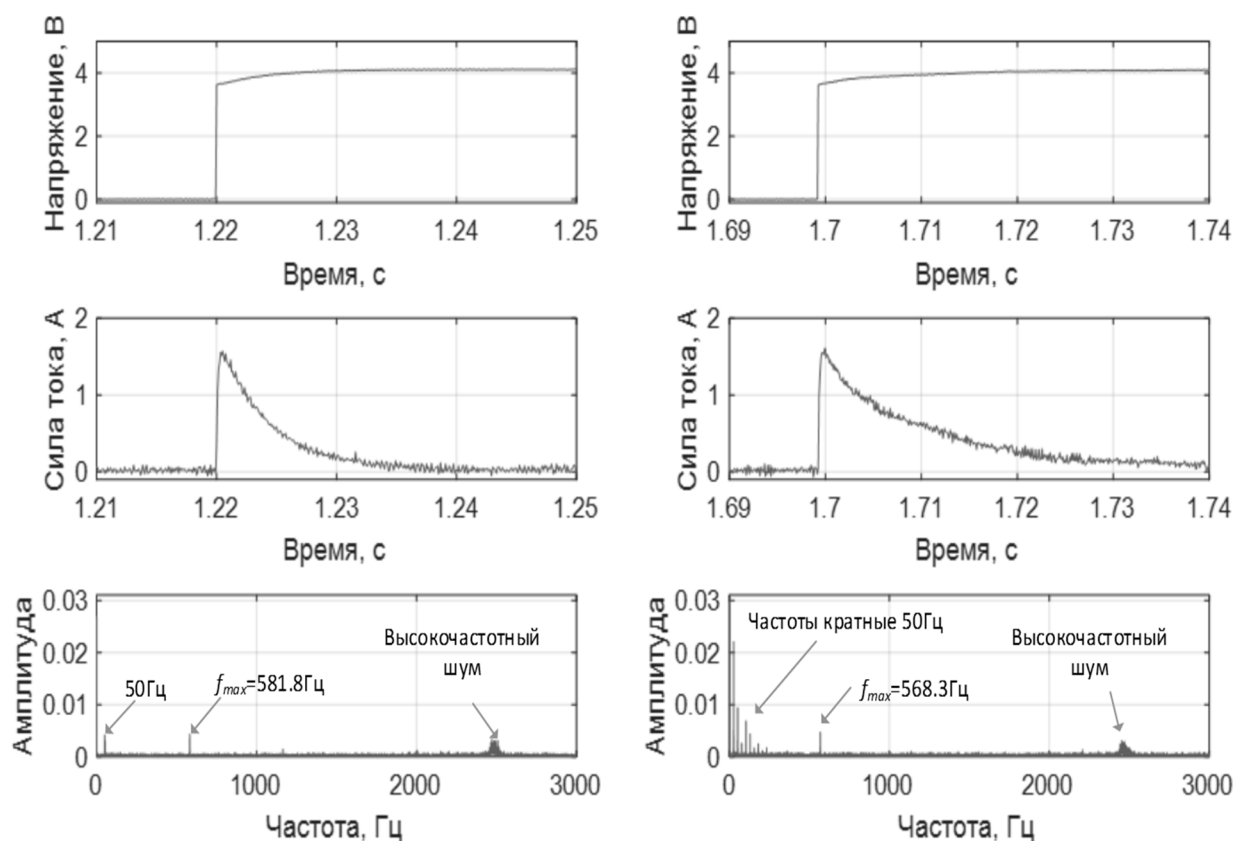


Рис. 4. Входные и выходные тестовые данные при идентификации ДПТ без нагрузки (слева) и с дебалансом $m_1 = 15$ г (справа)

Обработка результатов серии параллельных экспериментов показала, что с доверительной вероятностью $P=0,95$ опыты являются воспроизводимыми по Кохрену, а погрешность определения момента инерции якоря ДПТ как по формуле (4), так и по формуле (7) не превышает 5%.

Выводы

В ходе проведенного исследования на основе машинного и натурного экспериментов была апробирована предложенная методика для оценки параметров момента инерции двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. В связи с чем ее можно применить при

использовании в лабораторной установке ДПТ с неизвестными параметрами. Установлено, что в результате идентификации также можно с точностью до 5 % уточнять моменты инерции дебалансов, тем самым компенсируя в модели погрешности в изготовлении, наличие дополнительных крепежных элементов, разброс в параметрах плотности материалов. Кроме того, описанная методика может быть использована при выполнении статической балансировки. Зная плоскость неуравновешенности, можно минимизировать момент инерции нагрузки, присоединяя корректирующие массы.

Список литературы

1. Zhusubaliyev Z.T., Avrutin V., Rubanov V.G., Bushuev D.A., Titov D. V., Yanochkina O.V. Persistence border collisions in a vibrating system excited by an unbalanced motor with a relay control // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol.1959. №080022.
2. Salah M. S., Abdelati M. Parameters Identification of a Permanent Magnet DC Motor Conference // IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2010), Austria (February 2010), 2010.
3. Гаргаев А.Н., Каширских В.Г. Идентификация параметров двигателей постоянного тока с помощью поисковых методов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2013. С. 131-134
4. Krneta R., Antic S., Stojanovic D. Recursive least square method in parameters identification of DC motors models // Facta Universitatis. 2005. 18 (3). P. 467–478.
5. Hadeif M., Bourouina A., Mekideche M. R. Parameter identification of a DC motor via moments method // International Journal of Electrical and Power Engineering. 2008. 1(2). P. 210–214.
6. Гаргаев А.Н., Каширских В.Г., Нестеровский А.В. Сравнительный анализ методов динамической идентификации параметров электродвигателей // Сб. трудов XI международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах» (24-25 ноября 2015 г.). Кемерово: КГТУ им. Т.Ф. Горбачева, 2015.
7. Wu W. DC Motor Parameter Identification Using Speed Step Responses // Modelling and Simulation in Engineering. 2012. №189757.
8. Tutunji T. A. DC motor identification using impulse response data // Conference on EUROCON, Serbia & Montenegro (22-24 November 2005). 2005. P. 1734-1736
9. Lord W., Hwang J. H. Pasek's Technique for Determining the Parameters of High-Performance DC Motors // Proceedings of the Third Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices. University of Illinois. May 1974. P. R.1-10,
10. Hadeif M., Mekideche M.R. Moments and Pasek's methods for parameter identification of a DC motor // Journal of Zhejiang University – Science C. 2011. 12(2). P. 124-131.
11. Волков Н.И., Миловзоров В.П. Электромашинные устройства автоматики. 2-е изд., перераб. и доп. М., 1986. 335 с.
12. Patent EP0193761B1, 03.04. 1998. Strunk T. L., Westerman G.S. Method for testing DC motors. 29.05.1991.
13. Бушуев Д.А., Рубанов В.Г., Бажанов А.Г. Методы интеграции моделей электродвигателей в среду MSC.Adams для совместного моделирования динамики механи-

ческих объектов с системами управления // Сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. БГТУ им. В. Г. Шухова «Наукоемкие технологии и инновации». Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. С. 10-14.

Поступила в редакцию 12.02.2019

Подписана в печать 04.03.2019

Reference

1. Zhusubaliyev Z.T., Avrutin V., Rubanov V.G., Bushuev D.A., Titov D. V., Yanochkina O.V. Persistence border collisions in a vibrating system excited by an unbalanced motor with a relay control. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol.1959, №080022.
2. Salah M. S., Abdelati M. Parameters Identification of a Permanent Magnet DC Motor Conference. IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2010), Austria (February 2010), 2010.
3. Gargaev A.N., Kashirskih V.G. Identifikacija parametrov dvigatelej postojannogo toka s pomoshh'ju poiskovyh metodov. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*, 2013, pp. 131-134 (In Russ.).
4. Krneta R., Antic S., Stojanovic D. Recursive least square method in parameters identification of DC motors models. *Facta Universitatis*, 2005, 18 (3), pp. 467–478.
5. Hadeif M., Bourouina A., Mekideche M. R. Parameter identification of a DC motor via moments method. *International Journal of Electrical and Power Engineering*, 2008, 1(2), pp. 210–214.
6. Gargaev A.N., Kashirskih V.G., Nesterovskij A.V. Sravnitel'nyj analiz metodov dinamicheskoy identifikacii parametrov jelektrodvigatelej. Sb. trudov XI mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti predpriyatij v promyshlenno razvityh regionah. Kemerovo, 2015 (In Russ.).
7. Wu W. DC Motor Parameter Identification Using Speed Step Responses. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2012, №189757.
8. Tutunji T. A. DC motor identification using impulse response data. Conference on EUROCON, Serbia & Montenegro (22-24 November 2005), 2005, pp. 1734-1736
9. Lord W., Hwang J. H. Pasek's Technique for Determining the Parameters of High-Performance DC Motors. *Proceedings of the Third Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices*. University of Illinois, May 1974. pp. R.1-10.
10. Hadeif M., Mekideche M.R. Moments and Pasek's methods for parameter identification of a DC motor. *Journal of Zhejiang University – Science C*, 2011, 12(2), pp. 124-131.
11. Volkov N.I., Milovzorov V.P. *Jelektromashinnye ustrojstva avtomatiki*. Moscow, 1986, 335 p. (In Russ.).

12. Patent EP0193761B1, 03.04. 1998. Strunk T. L., Westerman G.S. Method for testing DC motors. 29.05.1991.

13. Bushuev D.A., Rubanov V.G., Bazhanov A.G. Metody integracii modelej jelektrorvigatelej v sredu MSC.Adams dlja sovmestnogo modelirovanija dinamiki mehanicheskih ob#ektov s sistemami upravlenija. Sb. dokl. mezhdunar. nauch.-tehn. konf. BGTU im. V. G. Shuhova. Naukoemkie tehnologii i innovacii. Belgorod, 2016, pp. 10-14 (In Russ.).

Received 12.02.2019

Accepted 04.03.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Василий Григорьевич Рубанов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической кибернетики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация
e-mail: rubanov.vg@bstu.ru

Vasiliy G. Rubanov, Doctor of Engineering Sciences, Profesor, Head of Technical Cybernetics Department, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: rubanov.vg@bstu.ru

Дмитрий Александрович Бушуев, кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация
e-mail: bushuev.da@bstu.ru

Dmitriy A. Bushuev, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Technical Cybernetics Department, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: bushuev.da@bstu.ru

Елена Михайловна Паращук, кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация,
e-mail: kara1205@mail.ru

Elena M. Parashchuk, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Technical Cybernetics Department Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: kara1205@mail.ru

Андрей Константинович Трикула, студент, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация,
e-mail: trikula_andrew@mail.ru

Andrei K. Trikula, Student, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: trikula_andrew@mail.ru

УДК 004.8

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-109-123

К вопросу устойчивости прогнозирующей модели на основе кратномасштабного вейвлет-преобразования

Е.А. Сакрутина ✉

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова Российской академии наук, Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65

✉ e-mail: consoft@ipu.ru

Резюме

Цель исследования. Настоящая работа посвящена проблеме создания прогнозирующих моделей производственных процессов и условиям их устойчивости.

Методы: Прогнозирующие модели активно применяются в современных системах управления, интеллектуальных системах информационной поддержки принятия решений, играют огромную роль в любой деятельности, связанной с процессами обработки сигналов, в том числе обнаружения аномалий различных технологических процессов и оценке рискового потенциала объектов критической информационной инфраструктуры, а также могут применяться в системах мониторинга угроз безопасности. Особый класс в ряду прогнозирующих моделей представляют собой модели, основанные на знаниях о протекающих процессах (например, закономерностях, извлекаемых из данных, накопленных в результате работы объекта).

Результаты. В статье рассмотрена относящаяся к этому классу виртуальная «мгновенная» модель объекта, представленная с учетом кратко-масштабного разложения векторов входных воздействий и прогноза выхода объекта. Рассматриваемая модель дает прогноз без учета возможных будущих состояний прогнозного фона. Для исследования устойчивости виртуальной «мгновенной» модели разработан подход, основанный на вейвлет-анализе, который характеризуется уникальной возможностью детального частотного анализа во времени. На основе этого подхода получены условия устойчивости прогнозирующей модели с выделением условий для аппроксимирующей и детализирующей составляющих для четырех типов соотношений между глубиной памяти по входу и выходу.

Заключение: В статье приведена прогнозирующая модель процесса нефтепереработки, в которой глубина памяти по входу больше глубины памяти по выходу. Показано, что точность прогноза виртуальной «мгновенной» модели выше, чем у линейной прогнозирующей модели при редких данных лабораторного анализа. Для построенной модели проиллюстрировано одно из условий устойчивости в зависимости от глубины разложения. На основе анализа полученных результатов можно сделать вывод о применимости полученных условий устойчивости для оценки рискового потенциала реализации прогноза развития процесса в системах мониторинга угроз безопасности.

Ключевые слова: прогнозирующая модель; кратномасштабное вейвлет-преобразование; условия устойчивости; ассоциативный поиск; безусловный прогноз.

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

Для цитирования: Сакрутина Е.А. К вопросу устойчивости прогнозирующей модели на основе кратномасштабного вейвлет-преобразования // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 109-123. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-109-123.

© Сакрутина Е.А., 2019

UDC 004.8

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-109-123

To a Question of Predicting Model Stability on the Basis of Multiple Scale Wavelet Transformation

Ekaterina A. Sakrutina ✉

Institute of Control Sciences named after V.A. Trapeznikov, 65, Profsoyuznaya str., Moscow, 117997,
Russian Federation

✉ e-mail: consoft@ipu.ru

Abstract

Purpose of research. The article is devoted to the development of production predicting models and their stability conditions.

Methods: Predicting models are actively used in modern control systems, in information support intellectual systems of decision-making. They have a huge role in any activity connected with signals' processing including anomalies detection of various technological processes and assessment of risk potential of critical information infrastructure objects. They can also be used in monitoring systems of security threats. Special class among predicting models is represented by the models based on experiences of proceeding processes (for example, regularities taken from the data which are saved up as a result of an object work).

Results. Virtual "instant" model of an object belonging to this class is described in the article. It is presented taking into account multiple and large-scale decomposition of entrance influences vectors and the forecast of an object output. The described model gives the forecast without possible future conditions of an expected background. The approach based on the wavelet-analysis which is characterized by a unique opportunity of detailed frequency analysis in time is developed for stability study of virtual "instant" model. Stability conditions of the predicting model are received on the basis of this approach. This model has allocation conditions for approximating and detailing components for four types of ratios between memory depth on input and output.

Conclusion: Predicting model of oil processing in which memory depth on an input is more than memory depth on output is described in the article. It is shown that the accuracy of virtual "instant" model forecast is higher than linear predicting model has at rare data of laboratory analysis. One of stability conditions depending on decomposition depth is shown for the constructed model. On the basis of received results analysis it is possible to draw a conclusion on applicability of received stability conditions for risk potential assessment of process development forecast implementation in monitoring systems of security threats.

Keywords: predicting model; multiple scale wavelet transformation; stability conditions; associative search; unconditional forecast.

Competing interests: Authors state the lack of obvious and potential competing interests connected with publication of present article.

Keywords: predicting model; multiple scale wavelet transformation; stability conditions; associative search; unconditional forecast.

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

For citation: Sakrutina E. A. To a Question of Predicting Model Stability on the Basis of Multiple Scale Wavelet Transformation. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(2): 109-123 (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-109-123.

Введение

При решении задачи идентификации можно выделить широкий класс процессов, для управления которыми недостаточно построения линейных моделей. Кроме того, данные процессы могут иметь некоторые особенности в определенные моменты времени. В технических системах они зачастую имеют циклический характер. Примером причин этого факта может служить различие в составе сырья, поставляемого от различных поставщиков для технологических процессов непрерывного и полунепрерывного производства. Другой пример – сезонные и суточные колебания нагрузки в электрических сетях, что оказывает непосредственное влияние на процесс оптимизации режимов управления передачей электроэнергии. Хорошо известны колебания фондового рынка, обусловленные целым рядом экономических закономерностей. Поэтому актуальным является построение прогнозирующих моделей для нестационарных процессов такого типа объектов [1-3].

В течение последних двадцати лет для анализа нестационарных процессов в различных областях получило широкое применение вейвлет-преобразование, о чем свидетельствуют многочисленные публикации (как например [4-9]). Вейвлет-преобразование сигналов является обобщением спектрального анализа, например по отношению к преобразованию Фурье. В середине 80-х годов появились первые работы по

вейвлет-анализу временных (пространственных) рядов с выраженной неоднородностью [10]. Метод был представлен как альтернатива преобразованию Фурье, локализирующему частоты, но не дающему временного разрешения процесса.

В настоящее время вейвлет-анализ используется для обработки и синтеза нестационарных сигналов, для решения задач сжатия и кодирования информации, обработки изображений, в теории и практике распознавания образов, в частности, в медицине, и во многих других сферах. Эффективной оказалась практика применения вейвлетов для исследования геофизических полей, временных метеорологических рядов, прогнозирования землетрясений. Подход эффективен для исследования функций и сигналов, нестационарных во времени или неоднородных в пространстве. Вейвлет-анализ основан на применении специального линейного преобразования процессов для изучения интерпретируемых этими процессами реальных данных, характеризующих процессы и физические свойства реальных объектов, в частности, технологических процессов.

Вейвлет-преобразование как математический инструмент служит, главным образом, для анализа данных во временной и частотной областях. Теория вейвлетов может быть использована для идентификации систем в разных аспектах [11, 12]. Вейвлеты используются преимущественно для идентификации нелинейных систем с особенной структурой, где неизвестные изменяющиеся

во времени коэффициенты могут быть представлены как линейная комбинация базисных вейвлет-функций [13, 14].

Целью настоящей работы является получение условий устойчивости виртуальной «мгновенной» модели, дающей прогноз без учета возможных будущих состояний прогнозного фона.

Материалы и методы решения задачи

2.1. Виртуальные анализаторы и их особенности

Особенностью функционирования современных систем управления производственными процессами объектов с повышенным риском эксплуатации является использование программно-алгоритмических комплексов, называемых виртуальными анализаторами. Виртуальные анализаторы реализуют построение прогнозирующей модели технологического процесса на конкретном объекте, используя помимо текущих и архивных технологических данных модели на других уровнях управления. Стоит отметить, что результаты моделирования различных участков технологического процесса не становятся элементами сложной модели на более высоком уровне, а лишь формируют для нее вектор входной информации, компенсируя таким образом недостаточность априорной информации о прогнозируемом процессе дополнительными «виртуальными» измерениями [15].

Особенностями виртуальных анализаторов являются:

1) реализация адаптивного подхода к настройке моделей на основе использования всего спектра данных (опера-

тивных, архивных, ретроспективных – из базы знаний и экспертных заключений, текущих значений параметров моделей на других участках) при их функционировании;

2) использование моделей других технологических процессов, и, кроме того в качестве дополнительного источника априорной информации для идентификации моделируемого процесса рекомендуемые управляющие воздействия (которые, возможно, функционируют только в режиме советчика оператора).

На основе инструментов регрессионного анализа можно ответить на следующие вопросы:

- правильно ли определены входные и выходные параметры модели;
- на сколько точно описывает полученная модель имеющиеся экспериментальные данные (проверка гипотезы об адекватности модели).

Для проверки точности определения входных и выходных параметров модели процесса осуществляется проверка гипотезы о значимости параметров модели. Для оценки точности модели процесса осуществляется проверка гипотезы об адекватности модели. Точность модели определяется в зависимости от ошибок прогноза модели. В ряде задач допустимая ошибка измерений задается стандартами, технологическими регламентами или другими требованиями.

Ошибкой прогноза ϵ_i называется разность между фактическим значением выхода $y_i(t)$ процесса и прогнозным

значением выхода $\tilde{y}_i(t)$ модели процесса.

На основе анализа ошибки можно определить, насколько адекватна построенная прогнозирующая модель. Для анализа качества прогноза часто используют эмпирические функции ошибки [16, 17]: средняя абсолютная ошибка в процентах (mean absolute percentage error – MAPE); средняя абсолютная ошибка (mean absolute error – MAE); среднеквадратическая ошибка (mean squared error – MSE).

2.2. Прогнозирующая модель линейного нестационарного объекта

Особенность рассматриваемой прогнозирующей модели – то, что она является «мгновенной» линейной моделью нелинейного нестационарного объекта, описывающей процесс исключительно для момента времени t .

Пусть прогнозирующая «мгновенная» ассоциативная модель нелинейного нестационарного объекта имеет вид:

$$y(t) = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i y(t-i) + \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{\tau_s} b_{s,j} x(t-j)_s, \quad (1)$$

где $y(t)$ – прогноз вектора выхода объекта в момент времени t ; $x(t)$ – вектор входных воздействий; m – глубина памяти по выходу; τ_s – глубина памяти по входу; S – размерность вектора входов, a_i ; $b_{s,j}$ – настраиваемые коэффициенты; $x(t-j)_s$ – значения вектора входных воздействий, выбираемые не в порядке хронологического убывания.

Запишем виртуальную прогнозирующую модель (1) в стандартизованном масштабе:

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^m \hat{a}_i \hat{y}(t-i) + \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{\tau_s} \hat{b}_{s,j} \hat{x}(t-j)_s, \quad (2)$$

$$\text{где } \hat{y} = \frac{y - M[y]}{\sigma_y}, \quad \hat{x} = \frac{x - M[x]}{\sigma_x},$$

$M[\hat{y}] = M[\hat{x}] = 0$, $\sigma_{\hat{y}} = \sigma_{\hat{x}} = 1$, $\hat{a}_i$, $\hat{b}_{s,j}$ – стандартизованные коэффициенты.

Для выбранного уровня детализации L для текущего вектора входа в стандартизованном масштабе получаем кратно-масштабное разложение векторов входных воздействий и прогноза выхода [18]:

$$\hat{x}(t) = \sum_{k=1}^N c_{L,k}^{\hat{x}}(t) \varphi_{L,k}(t) + \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^N d_{l,k}^{\hat{x}}(t) \psi_{l,k}(t)$$

$$\hat{y}(t) = \sum_{k=1}^N c_{L,k}^{\hat{y}}(t) \varphi_{L,k}(t) + \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^N d_{l,k}^{\hat{y}}(t) \psi_{l,k}(t),$$

где L – глубина кратно-масштабного разложения ($1 \leq L \leq L_{\max}$, где $L_{\max} = \lceil \log_2 N^* \rceil$ и N^* – мощность множества состояний системы в базе знаний о динамике системы); $\varphi_{L,k}(t)$ масштабирующие функции; $\psi_{l,k}(t)$ – вейвлет-функции, которые получаются из материнских вейвлетов путем растяжения/сжатия и сдвига:

$$\psi_{l,k}(t) = 2^{l/2} \psi_{\text{материнский}}(2^l t - k),$$

где в качестве материнских вейвлетов рассматриваются вейвлеты Хаара; l – уровень детализации анализа; $c_{L,k}$, $d_{l,k}$ – масштабирующие и детализирующие коэффициенты, вычисляемые на основе алгоритма Малла [18].

Запишем уравнение (2) с учетом кратного-масштабного разложения векторов входных воздействий и прогноза выхода:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^N c_{L,k}^{\hat{y}}(t) \varphi_{L,k}(t) + \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^N d_{l,k}^{\hat{y}}(t) \psi_{l,k}(t) = \\ & = \sum_{i=1}^m \left(\hat{a}_i \sum_{k=1}^N c_{L,k}^{\hat{y}}(t-i) \varphi_{L,k}(t-i) \right) + \\ & + \sum_{i=1}^m \left(\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^N \hat{a}_i d_{l,k}^{\hat{y}}(t-i) \psi_{l,k}(t-i) \right) + \\ & + \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{r_s} \left(\sum_{k=1}^N \hat{b}_{s,j} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-j) \varphi_{L,k}(t-j) \right) + \\ & + \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{r_s} \left(\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^N \hat{b}_{s,j} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-j) \psi_{l,k}(t-j) \right). \end{aligned}$$

В последнем соотношении сгруппируем члены, содержащие сомножителем одинаковые вейвлеты. При этом учитываем, что в силу процедуры ассоциативного поиска, коэффициенты $\hat{a}$ и $\hat{b}$ могут быть отличны от нуля для входов $\hat{x}$, выбранных из архива в соответствии с ассоциативным критерием [19], а не в хронологической последовательности.

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^N c_{L,k}^{\hat{y}}(t) \varphi_{L,k}(t) + \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^N d_{l,k}^{\hat{y}}(t) \psi_{l,k}(t) = \\ & = \sum_{k=1}^N \left\{ \sum_{i=1}^m \hat{a}_i c_{L,k}^{\hat{y}}(t-i) \varphi_{L,k}(t-i) + \right. \\ & + \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{r_s} \hat{b}_{s,j} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-j) \varphi_{L,k}(t-j) \left. \right\} + \\ & + \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^N \left\{ \sum_{i=1}^m \hat{a}_i d_{l,k}^{\hat{y}}(t-i) \psi_{l,k}(t-i) + \right. \\ & + \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{r_s} \hat{b}_{s,j} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-j) \psi_{l,k}(t-j) \left. \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Динамический объект, описываемый соотношением (3), будет устойчив, если одновременно будут устойчивы следующие N уравнений, соответствующие соотношениям относительно

каждого из слагаемых по $k = \overline{1, N}$ в левой и правой частях (3):

$$\begin{aligned} & c_{L,k}^{\hat{y}}(t) \varphi_{L,k}(t) + \sum_{l=1}^L d_{l,k}^{\hat{y}}(t) \psi_{l,k}(t) = \\ & = \left\{ \sum_{i=1}^m \hat{a}_i c_{L,k}^{\hat{y}}(t-i) \varphi_{L,k}(t-i) + \right. \\ & + \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{r_s} \hat{b}_{s,j} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-j) \varphi_{L,k}(t-j) \left. \right\} + \\ & + \sum_{l=1}^L \left\{ \sum_{i=1}^m \hat{a}_i d_{l,k}^{\hat{y}}(t-i) \psi_{l,k}(t-i) + \right. \\ & + \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{r_s} \hat{b}_{s,j} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-j) \psi_{l,k}(t-j) \left. \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

2.3. Условия устойчивости модели

Пусть $P = \max_{s=1, S} r_s$. Модель вида (4)

рассмотрим при условиях: $m > P$, $m < P$, $m = P \neq 1$ и $m = P = 1$.

Если глубина памяти по входу меньше чем глубина памяти по выходу, т.е. $m > P$, то (4) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} & c_{L,k}^{\hat{y}}(t) \varphi_{L,k}(t) + \sum_{l=1}^L d_{l,k}^{\hat{y}}(t) \psi_{l,k}(t) = \\ & = \hat{a}_1 c_{L,k}^{\hat{y}}(t-1) \varphi_{L,k}(t-1) + \dots \\ & + \hat{a}_P c_{L,k}^{\hat{y}}(t-P) \varphi_{L,k}(t-P) + \dots \\ & + \hat{a}_m c_{L,k}^{\hat{y}}(t-m) \varphi_{L,k}(t-m) + \\ & + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-1) \varphi_{L,k}(t-1) + \dots \\ & + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,P} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-P) \varphi_{L,k}(t-P) + \\ & + \sum_{l=1}^L \left\{ \hat{a}_1 d_{l,k}^{\hat{y}}(t-1) \psi_{l,k}(t-1) + \dots \right. \\ & + \hat{a}_P d_{l,k}^{\hat{y}}(t-P) \psi_{l,k}(t-P) + \dots \\ & + \hat{a}_m d_{l,k}^{\hat{y}}(t-m) \psi_{l,k}(t-m) \left. \right\} + \\ & + \sum_{l=1}^L \left\{ \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-1) \psi_{l,k}(t-1) + \dots \right. \\ & + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,P} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-P) \psi_{l,k}(t-P) \left. \right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Рассмотрим по отдельности аппроксимирующую и детализирующую часть равенства (5) соответственно:

$$\begin{aligned} c_{L,k}^{\hat{y}}(t) \varphi_{L,k}(t) = & \\ = & \left[\hat{a}_1 c_{L,k}^{\hat{y}}(t-1) + \right. \\ & + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-1) \left. \right] \varphi_{L,k}(t-1) + \dots \\ & + \left[\hat{a}_P c_{L,k}^{\hat{y}}(t-P) + \right. \\ & + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,P} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-P) \left. \right] \varphi_{L,k}(t-P) + \\ & + \hat{a}_{P+1} c_{L,k}^{\hat{y}}(t-P-1) \varphi_{L,k}(t-P-1) + \dots \\ & + \hat{a}_m c_{L,k}^{\hat{y}}(t-m) \varphi_{L,k}(t-m), \end{aligned} \quad (6)$$

где $k = \overline{1, N}$.

$$\begin{aligned} d_{l,k}^{\hat{y}}(t) \psi_{l,k}(t) = & \left[\hat{a}_1 d_{l,k}^{\hat{y}}(t-1) + \right. \\ & + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-1) \left. \right] \psi_{l,k}(t-1) + \dots + \\ & + \left[\hat{a}_P d_{l,k}^{\hat{y}}(t-P) + \right. \\ & + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,P} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-P) \left. \right] \psi_{l,k}(t-P) + \\ & + \hat{a}_{P+1} d_{l,k}^{\hat{y}}(t-P-1) \psi_{l,k}(t-P-1) + \dots \\ & + \hat{a}_m d_{l,k}^{\hat{y}}(t-m) \psi_{l,k}(t-m), \end{aligned} \quad (7)$$

где $k = \overline{1, N}$, $l = \overline{1, L}$.

В результате преобразований соотношений (6) и (7) к виду системы в пространстве состояний и с учетом, что устойчивость такой системы определяется характеристическим полиномом диагональной матрицы [20], получаем условия устойчивости модели объекта (5) (а значит, (6) и (7) для $\forall k = \overline{1, N}$, $l = \overline{1, L}$:

- для аппроксимирующей части:

$$\left| \frac{\hat{a}_1 c_{L,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-1)}{2c_{L,k}^{\hat{y}}(t)} \right| < 1,$$

$$\left| \frac{\hat{a}_2 c_{L,k}^{\hat{y}}(t-2) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,2} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-2)}{\hat{a}_1 c_{L,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-1)} \right| < 1,$$

...,

$$\left| \frac{\hat{a}_{P+1} c_{L,k}^{\hat{y}}(t-P-1)}{\hat{a}_P c_{L,k}^{\hat{y}}(t-P) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,P} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-P)} \right| < 1,$$

$$\left| \frac{\hat{a}_{P+2} c_{L,k}^{\hat{y}}(t-P-2)}{\hat{a}_{P+1} c_{L,k}^{\hat{y}}(t-P-1)} \right| < 1, \dots,$$

$$\left| \frac{2\hat{a}_m c_{L,k}^{\hat{y}}(t-m)}{\hat{a}_{m-1} c_{L,k}^{\hat{y}}(t-m+1)} \right| < 1.$$

- для детализирующей части:

$$\left| \frac{\hat{a}_1 d_{l,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-1)}{2d_{l,k}^{\hat{y}}(t)} \right| < 1,$$

$$\left| \frac{\hat{a}_2 d_{l,k}^{\hat{y}}(t-2) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,2} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-2)}{\hat{a}_1 d_{l,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-1)} \right| < 1,$$

...,

$$\left| \frac{\hat{a}_{P+1} d_{l,k}^{\hat{y}}(t-P-1)}{\hat{a}_P d_{l,k}^{\hat{y}}(t-P) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,P} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-P)} \right| < 1,$$

$$\left| \frac{\hat{a}_{P+2} d_{l,k}^{\hat{y}}(t-P-2)}{\hat{a}_{P+1} d_{l,k}^{\hat{y}}(t-P-1)} \right| < 1, \dots,$$

$$\left| \frac{2\hat{a}_m d_{l,k}^{\hat{y}}(t-m)}{\hat{a}_{m-1} d_{l,k}^{\hat{y}}(t-m+1)} \right| < 1.$$

В результате аналогичных преобразований получим условия устойчивости прогнозирующей модели объекта:

а) для случая, если глубина памяти по входу больше, чем глубина памяти по выходу ($m < P$) для $\forall k = \overline{1, N}$, $l = \overline{1, L}$:

- для аппроксимирующей части:

$$\left| \frac{\hat{a}_1 c_{L,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-1)}{2c_{L,k}^{\hat{y}}(t)} \right| < 1,$$

$$\left| \frac{\hat{a}_2 c_{L,k}^{\hat{y}}(t-2) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,2} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-2)}{\hat{a}_1 c_{L,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-1)} \right| < 1,$$

$$\left| \frac{\sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m+1} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-m-1)}{\hat{a}_m c_{L,k}^{\hat{y}}(t-m) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-m)} \right| < 1,$$

$$\left| \frac{\sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m+2} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-m-2)}{\sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m+1} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-m-1)} \right| < 1, \dots,$$

$$\left| \frac{2 \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,P} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-P)}{\sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,P-1} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-P-1)} \right| < 1.$$

- для детализирующей части:

$$\left| \frac{\hat{a}_1 d_{l,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-1)}{2d_{l,k}^{\hat{y}}(t)} \right| < 1,$$

$$\left| \frac{\hat{a}_2 d_{l,k}^{\hat{y}}(t-2) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,2} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-2)}{\hat{a}_1 d_{l,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-1)} \right| < 1,$$

...,

$$\left| \frac{\sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m+1} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-m-1)}{\hat{a}_m d_{l,k}^{\hat{y}}(t-m) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-m)} \right| < 1,$$

$$\left| \frac{\sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m+2} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-m-2)}{\sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m+1} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-m-1)} \right| < 1, \dots,$$

$$\left| \frac{2 \hat{b}_{s,P} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-P)}{\sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,P-1} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-P-1)} \right| < 1.$$

б) для случая, если глубина по входу равна глубине памяти по выходу, но не равны 1 ($m = P \neq 1$) для $\forall k = \overline{1, N}, l = \overline{1, L}$:

- для аппроксимирующей части:

$$\left| \frac{\hat{a}_1 c_{L,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-1)}{2c_{L,k}^{\hat{y}}(t)} \right| < 1,$$

$$\left| \frac{\hat{a}_2 c_{L,k}^{\hat{y}}(t-2) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,2} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-2)}{\hat{a}_1 c_{L,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-1)} \right| < 1,$$

...,

$$\left| \frac{2 \left(\hat{a}_m c_{L,k}^{\hat{y}}(t-m) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-m) \right)}{\hat{a}_{m-1} c_{L,k}^{\hat{y}}(t-m+1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m-1} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-m+1)} \right| < 1.$$

- для детализирующей части:

$$\left| \frac{\hat{a}_1 d_{l,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-1)}{2d_{l,k}^{\hat{y}}(t)} \right| < 1,$$

$$\left| \frac{\hat{a}_2 d_{l,k}^{\hat{y}}(t-2) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,2} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-2)}{\hat{a}_1 d_{l,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-1)} \right| < 1,$$

...,

$$\left| \frac{2 \left(\hat{a}_m d_{l,k}^{\hat{y}}(t-m) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-m) \right)}{\hat{a}_{m-1} d_{l,k}^{\hat{y}}(t-m+1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m-1} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-m+1)} \right| < 1.$$

в) для случая, если глубины памяти по входу и по выходу равны 1 ($m = P = 1$) для $\forall k = \overline{1, N}, l = \overline{1, L}$ для аппроксимирующей и детализирующей частей:

$$\left| \frac{\hat{a}_1 \hat{c}_{L,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} \hat{c}_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-1)}{\hat{c}_{L,k}^{\hat{y}}(t)} \right| < 1,$$

$$\left| \frac{\hat{a}_1 \hat{d}_{l,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} \hat{d}_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-1)}{\hat{d}_{l,k}^{\hat{y}}(t)} \right| < 1.$$

$$T(t) = \sum_{i=1}^4 b_i F_i(t-1) + b_5 F_5(t-3) + b_6 F_6(t-5) + \sum_{j=7}^{12} b_j F_j(t-7), \quad (8)$$

где $T(t)$ – прогноз значения выкипания 10% фракции “150-250°C” (подробное описание переменных прогнозирующей модели представлено в [21]). Данная модель с точки зрения условий устойчивости относится к типу, когда глубина памяти по входу ($P = 7$) больше чем глубина памяти по выходу ($m = 0$).

3. Результаты и их обсуждение

На основе предварительного анализа данных была построена прогнозирующая линейная модель следующего вида:

Сравнение качества ассоциативных моделей в соответствии с числом векторов, отбираемых из базы знаний об объекте

Число векторов в ассоциативной модели	MAPE	MAE	MSE	Максимальная абсолютная ошибка	Минимальная абсолютная ошибка
195	0,30886%	0,50004	0,42292	3,32514	0,00011
170	0,30058%	0,48662	0,40238	3,17054	0,00093
152	0,29356%	0,47525	0,38331	2,84228	0,00020
133	0,28576%	0,46262	0,36426	2,65459	0,00064
113	0,27167%	0,43978	0,33527	2,21305	0,00010
101	0,26629%	0,43105	0,32104	2,33122	0,00019
86	0,25112%	0,40656	0,29165	2,53347	0,00002
65	0,22790%	0,36897	0,24949	2,46776	0,00027
61	0,22249%	0,36024	0,23835	2,52234	0,00002
60	0,22230%	0,35992	0,23673	2,49180	0,00042
58	0,22063%	0,35721	0,23372	2,44692	0,00003
55	0,21527%	0,34854	0,22429	2,46557	0,00007
54	0,21637%	0,35035	0,22685	2,41414	0,00013
50	0,21267%	0,34437	0,21904	2,24581	0,00021
46	0,20609%	0,33370	0,20835	2,21200	0,00002
42	0,19653%	0,31823	0,19297	2,35652	0,00001
41	0,19486%	0,31556	0,18879	2,17517	0,00041

Ассоциативная модель будет иметь структуру линейной модели (8), но принципиальное отличие ассоциатив-

ной модели заключается в формировании на каждом такте новой модели на основе базы знаний об объекте, которая

с течением времени обновляется и уточняется. Для определения необходимого количества входных векторов для построения точной ассоциативной модели, на тестовой выборке (2400 тактов) воспользуемся рядом оценок точности и адекватности прогноза. В таблице 1 приведены 17 вариантов числа входных векторов, на основе которых строились ассоциативные модели, для которых рассчитаны показатели точности модели: средняя абсолютная ошибка в процентах (MAPE), средняя абсолютная ошибка (MAE), средняя абсолютная ошибка (MSE), максимальная и минимальная абсолютная ошибка. Из рассматриваемых моделей выбрана наилучшая ассоциативная модель, т.е. наиболее точная и с меньшим количеством больших ошибок, а именно построенная на основе 42 векторов, отбираемых из базы знаний об объекте.

Прогноз для рассматриваемого процесса строился на основе линейной и ассоциативной моделей для 10525 тактов (1 такт = 10 мин.). На рис. 1 приведены результаты моделирования для тактов $t = \overline{2,126}$, где приведены зависимости данных лабораторного анализа температуры выкипания 10% фракции «150-250°C» ($T_{process}$) от времени t (измерения являются редкими и не периодическими), зависимость прогнозов температуры выкипания 10% фракции «150-250°C» на основе линейной модели (T_{linear_model}) и ассоциативной модели ($T_{associative_model}$) от времени t . На рис. 2 приведены результаты

моделирования для тактов $t = \overline{52,76}$ в укрупненном масштабе. Построенная виртуальная «мгновенная» модель дает лучшие результаты, по сравнению с применяемыми линейными прогнозирующими моделями при редких данных лабораторного анализа.

Для модели (8) на рис. 3 приведен пример выполнения критерия устойчивости для аппроксимирующей части:

$$\left| \frac{\sum_{i=1}^4 b_i c_{L,k}^F(t-1)}{2c_{L,k}^T(t)} \right| < 1$$

в зависимости от глубины разложения. При выборе глубины разложения для условий устойчивости виртуальных «мгновенных» моделей необходимо руководствоваться не только мощностью множества состояний системы в базе знаний, но и длительностью промежутка времени, на который делается прогноз.

Заключение

В работе представлены полученные на основе кратномасштабного вейвлет-преобразования условия устойчивости прогнозирующих моделей, основанных на методе ассоциативного поиска и дающих прогноз без учета возможных будущих состояний прогнозного фона.

Полученные условия устойчивости могут быть применены для оценки рисков потенциала [21, 22] реализации прогноза с использованием, например, вербально-числовой шкалы Харрингтона [23].

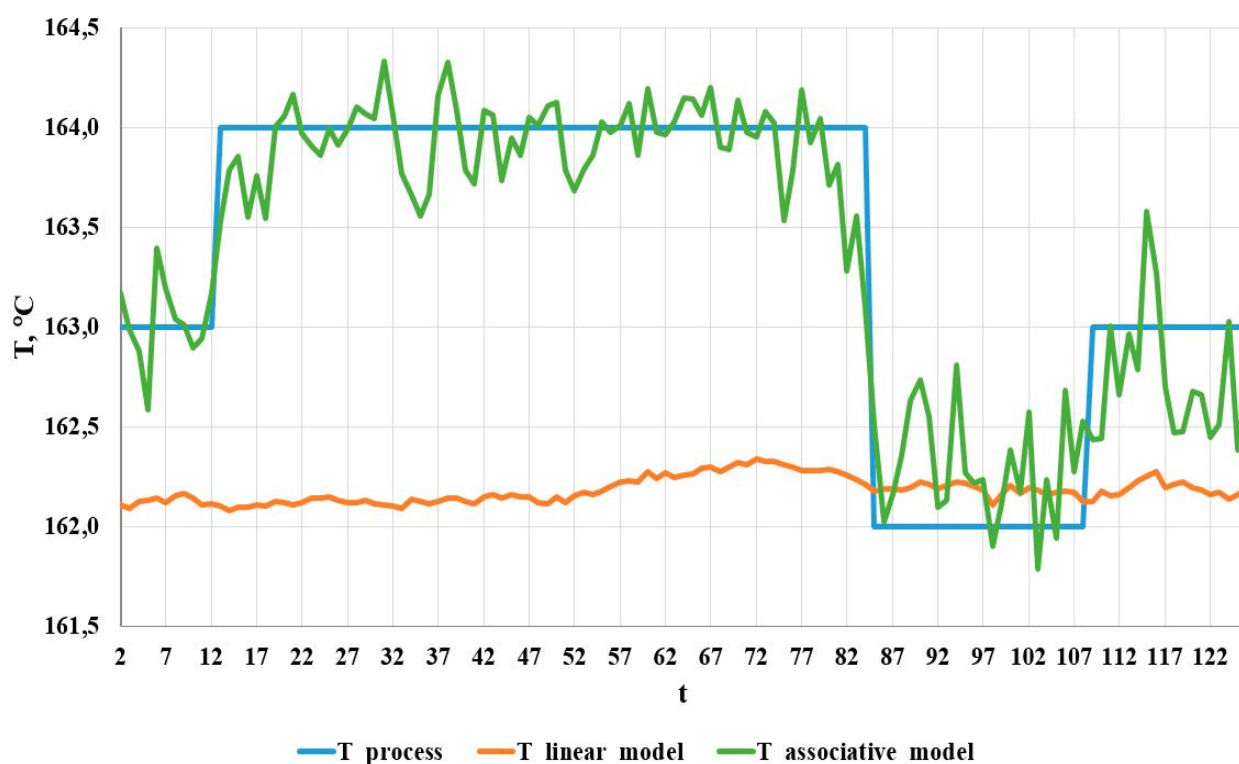


Рис. 1. Прогноз точки выкипания 10% фракции «150-250°C» на тактах 2-101

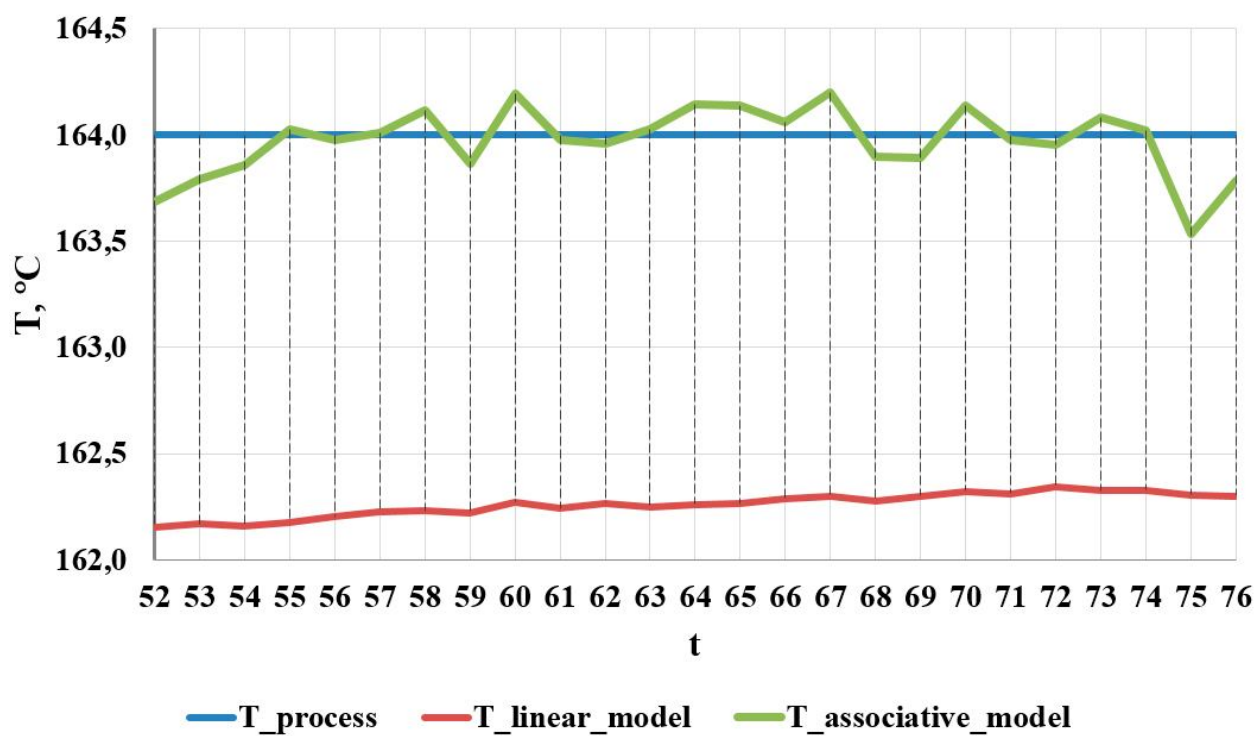


Рис. 2. Прогноз точки выкипания 10% фракции «150-250°C» на тактах 52-76

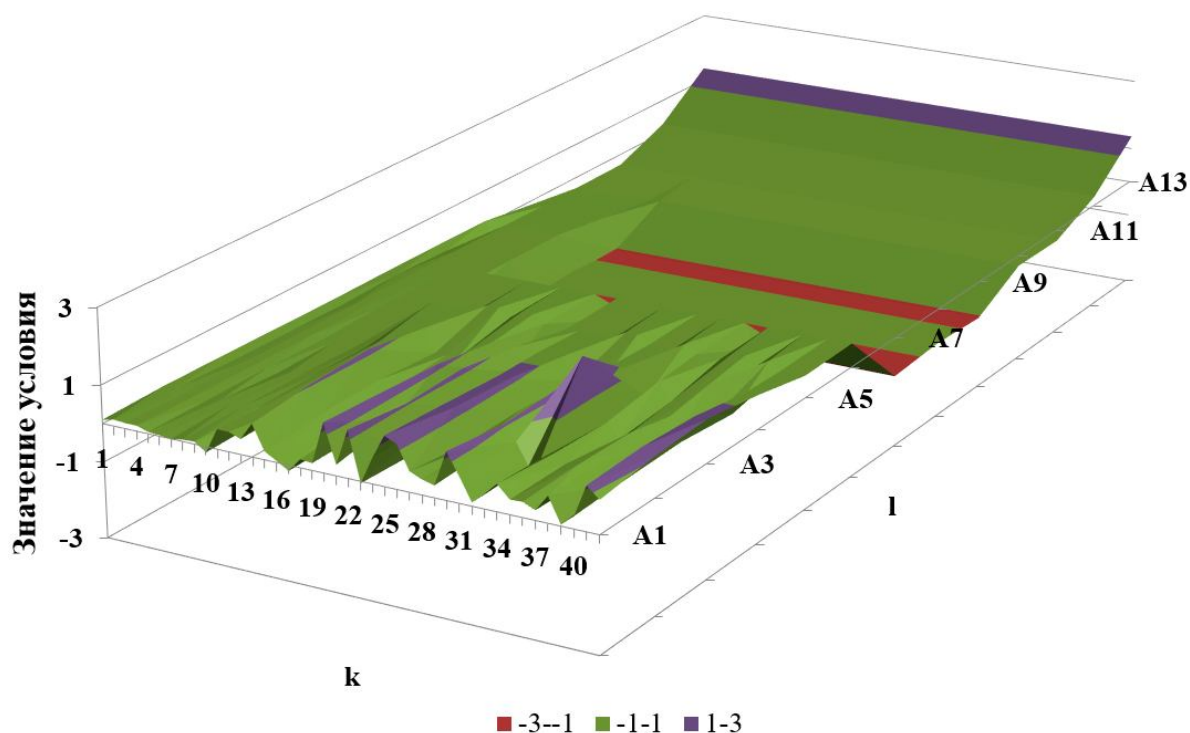


Рис. 3. Условие устойчивости аппроксимирующей части для прогнозирующей модели в точке $t = 55$ в зависимости от глубины разложения

Список литературы

1. Sakrutina E., Bakhtadze N. Towards the Possibility of Applying the Wavelet Analysis to Derive Predicting Models // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48. Is. 1. P. 409-414.
2. Бобырь М.В., Емельянов С.Г., Титов В. С. Автоматизированные нечетко-логические системы управления. М.: ИНФРА-М, 2016. С. 176.
3. Бобырь М.В., Архипов А.Е., Милостная Н.А., Абдулжаббар М.А.А. Устройство преобразования напряжения для нечеткой системы управления охлаждением изделий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22. № 4(79). С. 135-147. DOI: 10/21869/2223-1560-2018-22-4-135-147.
4. Toledo E., Gurevitz O., Hod H., Eldar M., Akselrod S. The use of a wavelet transform for the analysis of nonstationary heart rate variability signal during thrombolytic therapy as a marker of reperfusion // Computers in Cardiology. 1998. Vol. 25. P. 609-612.
5. Yuan X.-q., Shi Y.-k. Characteristic spectrum research in ae signals based on wavelet analysis // Proceedings of 2008 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications. 2008. P. 439- 442.
6. Wen F., Zhou Z., Qiao J. Notice of Retraction Use Matlab to Realize Acceleration Signal Processing of Armor-Piercing Bullet Penetrating Steel Target // Proceedings of 2010 2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science. 2010. P. 1-4.
7. Castello G., Moretti P., Vezzani S. Retention models for programmed gas chromatography // Journal of Chromatography A. 2015. Vol. 1216. Is. 10. P. 1607-1623.

8. Breidenstein B., Mörke T., Hockauf R., Jörn Ostermann J., Spitschan B. 2017. 2. Sensors, data storage and communication technologies. In book "Cyber-Physical and Intelligent Systems in Manufacturing and Life Cycle. Genetics and Intelligence - Keys to Industry 4.0". Academic Press. P. 7-278.
9. Muto A., Anandakrishnan S., Alley R.B., Horgan H.J., Parizek B.R., Koellner S., Christianson K., Holschuh N. Relating bed character and subglacial morphology using seismic data from Thwaites Glacier, West Antarctica // *Earth and Planetary Science Letters*. 2019. Vol. 507. P. 199-206.
10. Grossman A., Morlet J. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape // *SIAM Journal on Mathematical Analysis*. 1984. Vol. 14. No. 4. P. 723-736.
11. Ghanem R., Romeo F. A wavelet-based approach for the identification of linear time-varying dynamical systems // *Journal of Sound and Vibration*. 2000. Vol. 234. No. 4. P. 555-576.
12. Ghanem R., Romeo F. A wavelet-based approach for model and parameter identification of non-linear systems // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2001. Vol. 36. No. 5. P. 835-859.
13. Tsatsanis M., Giannakis G. Time-varying system identification and model validation using wavelets // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2002. Vol. 41. No. 12. P. 3512-3523.
14. Wei H.L., Billings S.A. Identification of time-varying systems using multiresolution wavelet models // *International Journal of Systems Science*. 2002. Vol. 33. No. 15. P. 1217-1228.
15. Бахтадзе Н.Н., Лотоцкий В.А. Современные методы управления производственными процессами // *Проблемы управления*. 2009. Спец. выпуск 3.1. С. 56-64.
16. Kassam S. The mean-absolute-error criterion for quantization // *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1977 IEEE International Conference on Acoustics (ICASSP '77)*. 1977. Vol. 2. P. 632-635.
17. Kim K.-Y., Park J., Sohmshtetty R. Prediction measurement with mean acceptable error for proper inconsistency in noisy weldability prediction data // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2017. Vol. 43. P. 18-29.
18. Mallat S. A wavelet tour of signal processing, Academic press. Amsterdam. 1999.
19. Сакрутина Е.А., Бахтадзе Н.Н. Идентификация систем на основе вейвлет-анализа // *Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014, Москва)*. М.: ИПУ РАН, 2014. С. 2868-2889.
20. Kwakernaak H., Sivan R. Linear optimal control systems. Wiley-interscience. NewYork. 1972.
21. Калашников А.О., Сакрутина Е.А. Модель прогнозирования рискового потенциала значимых объектов критической информационной инфраструктуры // *Информация и безопасность*. 2018. Т. 21, вып. 4. С. 465-470.
22. Калашников А.О., Сакрутина Е.А. Модель оценки рискового потенциала объектов критической инфраструктуры атомных электростанций // *Труды 11-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018, Москва)*. М.: ИПУ РАН, 2018. Т. 2. С. 457-461.

23. Harrington E.C. The desirable function // *Industrial Quality Control*. 1965. Vol. 21. No. 10. P. 494-498.

Поступила в редакцию 12.03.2019

Подписана в печать 09.04.2019

Reference

1. Sakrutina E., Bakhtadze N. Towards the Possibility of Applying the Wavelet Analysis to Derive Predicting Models. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 48, is. 1, pp. 409-414.
2. Bobyr M., Yemyelyanov S., Titov V. The automated indistinct and logical control systems. Moscow, INFRA-M Publ., 2016, pp. 176 (In Russ.).
3. Bobyr M.V., Arkhipov A.E., Milostnaya N.A., Abduldgabar M.A. Ustroistvo preobrazovaniya napryazheniya dlya nechetkoi sistemy upravleniya okhlazhdeniem izdelii [Device of conversion voltage for control cooling details based on the fuzzy logic]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta=Proceedings of Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 4(79), pp. 135-147. (In Russ.). DOI: 10/21869/2223-1560-2018-22-4-135-147.
4. Toledo E., Gurevitz O., Hod H., Eldar M., Akselrod S. The use of a wavelet transform for the analysis of nonstationary heart rate variability signal during thrombolytic therapy as a marker of reperfusion. *Computers in Cardiology*, 1998, vol. 25, pp. 609-612.
5. Yuan X.-q., Shi Y.-k. Characteristic spectrum research in ae signals based on wavelet analysis. *Proceedings of 2008 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications*, 2008, pp. 439- 442.
6. Wen F., Zhou Z., Qiao J. Notice of Retraction Use Matlab to Realize Acceleration Signal Processing of Armor-Piercing Bullet Penetrating Steel Target. *Proceedings of 2010 2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science*, 2010, pp. 1-4.
7. Castello G., Moretti P., Vezzani S. Retention models for programmed gas chromatography. *Journal of Chromatography A*, 2015, vol. 1216, is. 10, pp. 1607-1623.
8. Breidenstein B., Mörke T., Hockauf R., Jörn Ostermann J., Spitschan B. 2017. 2. Sensors, data storage and communication technologies. In book “Cyber-Physical and Gentelligent Systems in Manufacturing and Life Cycle. Genetics and Intelligence - Keys to Industry 4.0”. Academic Press, pp. 7-278.
9. Muto A., Anandakrishnan S., Alley R.B., Horgan H.J., Parizek B.R., Koellner S., Christianson K., Holschuh N. Relating bed character and subglacial morphology using seismic data from Thwaites Glacier, West Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, vol. 507, pp. 199-206.
10. Grossman A., Morlet J. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, 1984, vol. 14, no. 4, pp. 723-736.
11. Ghanem R., Romeo F. A wavelet-based approach for the identification of linear time-varying dynamical systems. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, vol. 234, no. 4, pp. 555-576.
12. Ghanem R., Romeo F. A wavelet-based approach for model and parameter identification of non-linear systems. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2001, vol. 36, no. 5, pp. 835-859.

13. Tsatsanis M., Giannakis G. Time-varying system identification and model validation using wavelets. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, vol. 41, no. 12, pp. 3512-3523.
14. Wei H.L., Billings S.A. Identification of time-varying systems using multiresolution wavelet models. *International Journal of Systems Science*. 2002, vol. 33, no. 15, pp. 1217-1228.
15. Bahtadze N.N., Lototsky V.A. Sovremennyye metody upravleniya proizvodstvennymi protsessami [Contemporary methods of production process control]. *Problemy upravleniya=Control Sciences*, 2009, no. 3. 1, pp. 56-64 (In Russ.).
16. Kassam S. The mean-absolute-error criterion for quantization. *Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1977 IEEE International Conference on Acoustics (ICASSP '77). 1977, vol. 2, pp. 632-635.
17. Kim K.-Y., Park J., Sohmshtetty R. Prediction measurement with mean acceptable error for proper inconsistency in noisy weldability prediction data. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, vol. 43, pp. 18-29.
18. Mallat S. A wavelet tour of signal processing, Academic press. Amsterdam, 1999.
19. Sakrutina E.A., Bahtadze N.N. Systems identification on the basis of the wavelet analysis. *Proc. XII All-Russian Congress on Control Sciences*. Moscow, 2014, pp. 2868-2889 (In Russ.).
20. Kwakernaak H., Sivan R. Linear optimal control systems. Wiley-interscience. New York, 1972.
21. Kalashnikov A.O., Sakrutina E.A. Model' prognozirovaniya riskovogo potentsiala znachimykh ob"ektov kriticheskoi informatsionnoi infrastruktury [A model of predicting risk protentional of significant plants of critical information infrastructure]. *Informatsiya i bezopasnost'=Information and Safety*, 2018, vol. 21, no. 4, pp. 465-470 (in Russ.).
22. Kalashnikov A.O., Sakrutina E.A. The Model of Evaluating the Risk Potential for Critical Infrastructure Plants of Nuclear Power Plants. *Proceedings of the 11th International Conference "Management of Large-Scale System Development"*. Moscow, 2018, vol. 2, pp. 457-461 (In Russ.).
23. Harrington E.C. The desirable function. *Industrial Quality Control.*, 1965, vol. 21, no. 10, pp. 494-498.

Received 12.03.2019

Accepted 09.04.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Екатерина Алексеевна Сакрутина,
научный сотрудник, Федеральное
государственное бюджетное учреждение
науки Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова Российской академии
наук, г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: consoft@ipu.ru

Ekaterina A. Sakrutina, Researcher, Institute
of Control Sciences named after V.A. Trapeznikov,
Moscow, Russian Federation
e-mail: consoft@ipu.ru

Выявление потерь электроэнергии на основе систематизации учетных данных

И.И. Степанов, Н.П. Ганюкова, А.А. Ханова ✉

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», Россия, 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16

✉ e-mail: akhanova@mail.ru

Резюме

Цель исследования: снижение затрат электросетевых компаний за счет разработки информационной системы управления коммерческими потерями. Реализация информационной системы предусматривает систематизацию информации и формирование балансов электроэнергии, способных выводить информацию по потерям на различных участках структуры сети, вплоть до воздушных и кабельных линий электропередач напряжением 0,4 кВ.

Методы. Метод оценки потерь по обобщенной информации о схемах и нагрузках сети состоит в расчете потерь электроэнергии на основе зависимостей потерь от суммарной длины и количества линий, суммарной мощности и количества оборудования, полученных на основе технических параметров линий и оборудования или статистических данных.

Результаты. Во многих электросетевых организациях наблюдаются проблемы с отслеживанием потерь электроэнергии на различных уровнях напряжения. Связано это как с отсутствием функционала в существующих информационных системах по формированию срезов по различным уровням структуры сети, так и с ведением самой структуры сети по каждому подключенному абоненту. Из-за отсутствия иерархии в существующих структурах по питающим элементам, у электросетевых компаний нет возможности системно отслеживать транспорт электроэнергии от питающих элементов (шин подстанций) до воздушных и кабельных линий передач низкого уровня напряжения 0,4 кВ. Без систематизации учетных данных невозможно определить на каких участках сети потери превышают допустимые нормы, и тем самым управлять ими.

Заключение. На основании поставленной задачи была реализована информационная система, позволяющая систематизировать учетные данные и формировать балансы электроэнергии по различным уровням структуры сети. Результатами (срезами данных) отчетов является информация по объему предполагаемых коммерческих потерь на определенных участках электрической сети.

Ключевые слова: потери электроэнергии; учетные данные; электросетевые компании; транспорт электроэнергии; информационная система.

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

Для цитирования: Степанов И.И., Ганюкова Н.П., Ханова А.А. Выявление потерь электроэнергии на основе систематизации учетных данных // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 124-136. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-124-136.

UDC 004.89

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-124-136

Identification of Electric Power Losses on the Basis of Systematization of Registration Data

Igor I. Stepanov, Natalya P. Ganyukova, Anna A. Khanova ✉

Astrakhan state technical university, 16, Tatishchev str., Astrakhan, 414056, Russian Federation

✉ e-mail: akhanova@mail.ru

Abstract

Purpose of research. is cost reduction of electric grid companies due to development of information management system of commercial losses. Implementation of an information system provides information systematization and formation of electric power balances capable to output information about losses on various sites of network structure such as 0.4 kV air and cable power lines.

Methods. Losses estimate method which uses summarized information about network schemes and loadings. This method includes calculation of electric power losses on the basis of losses dependence on total length and lines, total power and equipment received on the basis of technical parameters of lines and equipment or statistical data.

Results. There is a problem with losses tracking of electric power on various voltage levels in many power supply organizations. It is connected as with lack of functionality in existing information systems of cuts formation on various levels of network structure and also with network structure maintenance on each connected subscriber. Electric power supply organizations have no opportunity to trace electric power transport systemically from supplying elements (tires of substations) to 0.4 kV air and cable lines of low voltage transfer. It happens due to hierarchy lack in existing structures of supplying elements. It is impossible to define on what network sites losses exceed admissible norms and manage them without registration data systematization.

Conclusion. Information system was implemented on the basis of an objective which systematizes registration data and forms electric power balances on various levels of network structure. Review results (data collection) have information about alleged commercial losses on definite electric network sites.

Keyword: electric power losses; registration data; electric power supply organizations; electric power transport; information system.

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

For citation: Stepanov I.I., Ganyukova N.P., Khanova A.A. Identification of Electric Power Losses on the Basis of Systematization of Registration Data. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(2): 124-136 (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-124-136.

Введение

Главной целью электросетевых компаний является перемещение электроэнергии через собственную инфраструктуру от источников питания (электростанций) до конечных потребителей.

Электрическая энергия (ЭЭ) является единственным ресурсом, при перемещении которого используется часть данной энергии, не требующей для этого дополнительных расходов других ресурсов. При транспортировке электрической энергии неизбежны потери,

направленные на совершение полезной работы. Выявление и управление потерями является одной из главных задач электросетевых компаний (ЭСК). Это обусловлено как большими финансовыми потерями, так и качественным предоставлением услуг по передачи электроэнергии потребителям. Одной из главных причин высоких потерь электроэнергии является трудоемкость их выявления на локализованных участках сети с наименьшим уровнем напряжения. Потери необходимо заблаговременно рассчитывать и оперативно применять мероприятия по их снижению.

Вопросы автоматизации расчета потерь электроэнергии рассмотрены в работах Кутина В.М. [1], Шавалеева И.Р. [2] и др. Формализованные алгоритмы расчета потерь приведены в общем виде в работах Мирошника А.А. [3], Войтова О.Н. [4], на основе комбинации детерминированного и стохастического методов в работе Герасименко А.А. [5], а в работе Кольцова Ю.В. [6] на основе нейросетевого моделирования. Однако описанные подходы не позволяют в автоматическом режиме выделять участки сети (фидеры), на которых выявлены наибольшие коммерческие потери электроэнергии. **Цель работы** – снижение затрат электросетевых компаний за счет разработки информационной системы управления коммерческими потерями, способной разворачивать балансы электроэнергии до конечных элементов структуры сети, совершенствовать про-

цессы выявления и управления потерями в электросетях.

Материалы и методы решения задачи

Проблемная ситуация как некоторое состояние ЭСК при транспорте электрической энергии возникает при отклонении фактических потерь по n участкам сети (фидерам) $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ от допустимых значений. Фактические потери электрической энергии определяют как разность объема электрической энергии, который поступил в сеть сетевых организаций через источники питания (подстанции), и электрической энергии, которая была отпущена из сетей данных сетевых организаций конечным потребителям по кабельным и воздушным линиям электропередач (КЛ и ВЛ). Фактические потери P делятся на две составляющие [7].

1. Технические потери электроэнергии P_t , обусловленные физическими процессами, происходящими при передаче электроэнергии по электрическим сетям и выражающимися в преобразовании части электроэнергии в тепло в элементах сетей. Теоретически P_t могут быть измерены при установке соответствующих приборов, фиксирующих поступление и отпуск электроэнергии на рассматриваемом объекте. Практически же их значение можно получить только расчетным путем на основе известных законов электротехники.

2. Коммерческие потери P_k , обусловленные хищениями электроэнергии потребителями путем воздействия на

приборы учета, незаконного подключения к сети, неуплаты или неполной оплаты показаний счетчиков, безучетного или бездоговорного потребления. P_k не имеют самостоятельного математического описания и не рассчитываются автономно. Их значение определяют как разницу между фактическими потерями и техническими $P_k = P - P_t$.

Для формализации процесса управления можно описать состояние IC_b ЭСК вектором показателей фактических потерь $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ по n фидерам сети. На множестве показателей фактических потерь зададим некоторую оценочную функцию $\Psi_m(P)$, которая бы позволила измерить и оценить вектор показателей фактических потерь:

$$\Psi_m(P) = (\phi(p_1), \phi(p_2), \dots, \phi(p_n)).$$

На основании полученных оценок фактических потерь $(p_1, p_2, \dots, p_n)$ по n фидерам сети можно выявить уровень их отклонения от допустимых значений (Δ) , где Δ – величина рассогласования между значениями фактических и допустимых потерь Δp_j и p_j^0 ,

где $\Delta = \phi(p_j) - \phi(p_j^0)$.

И если значение Δ превышает некоторое пороговое значение δ_n или критическое значение

$$\delta_{кр}, (\Delta > \delta_n) \vee (\Delta > \delta_{кр}),$$

то ЭСК может сойти с траектории управления, ведущей к стратегии минимизации потерь. То есть выполняется правило: существуют показатели фактических потерь P , отклонение которых от допустимых значений в некоторый момент времени ведет к повышению

порогового или критического значений этих показателей, что диагностируется как проблемная ситуация IC_b . Это описание формализовано определяется следующим правилом [8]:

$$\exists P \forall IC(IC_j | (\Delta_j > \delta_n) \vee (\Delta_j > \delta_{кр})) = \\ = \phi(p_j) - \phi(p_j^0) \rightarrow IC_0,$$

где IC_b – проблемная ситуация. Решение проблемной ситуации IC_b определяется как воздействие на существующее состояние множеством различных мероприятий, что ведет к изменению исходного состояния IC_b и переходу к некоторому целевому состоянию IC_{end} , соответствующему стратегии минимизации потерь ЭСК, $Rh : IC_b \rightarrow IC_{end} |_{T, I, R}$, при ограничениях на: время изменения исходного состояния T , объем информации, требуемый для осуществления такого перехода I , ресурсы управления R для реализации управляющих воздействий (мероприятий). ЛПР должен оценить ситуацию в целом, рассмотреть возможные мероприятия, оценить их последствия и эффективность каждого решения, выбрать решение, наилучшее с его точки зрения. Такие мероприятия целесообразно проводить тогда, когда известны участки сети (фидеры), на которых выявлены наибольшие коммерческие потери электроэнергии. Чем точнее будет определен фидер, тем локальней будет участок для проведения различных работ. А для выявления потерь по фидерам необходимо совершенствовать системы учета электроэнергии и варианты систематизации и структуризации данных в виде отчетов.

Результаты и их обсуждение

Процесс «Управление транспортом ЭЭ» начинается с регистрации точки учета юридического или физического лица в системе (рис. 1). После регистрации точки учета производится обновление структуры сети ЭСК. В структуре сети к определенному элементу привязывается новая точка учета. Затем по обновленной структуре сети для новой точки учета автоматически устанавливается нормированное значение технических потерь. Данное значение можно отредактировать после расчета потерь электроэнергии на основе зависимостей потерь от суммарного количества линий и их длины, суммарного количества и мощности оборудования, полученных на основе технических параметров линий и оборудования или статистических данных. Потери электроэнергии должны рассчитываться как для рабочих, так и для ремонтных схем. В расчетную схему необходимо включить все элементы сети, потери в которых зависят от ее режима (линии, трансформаторы, высокочастотные заградители ВЧ-связи, токоограничивающие реакторы и т.п.).

Расчетные значения активных сопротивлений проводов воздушных линий (ВЛ) R_{Π} определяют с учетом температуры провода t_n , °C, зависящей от средней за расчетный период температуры окружающего воздуха t_g и плотности тока в проводе j , А/мм²:

$$R_{\Pi} = R_{20} [1 + 0,004(t_g - 20 + 8,3j^2 \sqrt{F/300})], \quad (1)$$

где R_{20} – стандартное справочное сопротивление провода сечением F , мм², при $t_n = 20$ °C. При отсутствии данных о средней плотности тока за расчетный период в каждом элементе электрической сети принимают расчетное значение $j = 0,5$ А/мм².

Потери электроэнергии в соединительных проводах и сборных шинах распределительных устройств подстанций (СППС) определяют по формуле

$$\Delta W_{nc} = 2,3F \cdot j^2 L \cdot \tau_o \cdot D, \quad (2)$$

где F – среднее сечение проводов (шин); L – суммарная протяженность проводов (шин) на подстанции; j – плотность тока.

Потери электроэнергии в измерительных трансформаторах тока (ТТ) определяют по формуле

$$\Delta W_{TT} = \Delta P_{TTном} T \beta_{TTcp}^2 k_{\phi}^2, \quad (3)$$

где $\Delta P_{TTном}$ – потери в ТТ при номинальной нагрузке; β_{TTcp} – среднее значение коэффициента токовой загрузки ТТ за расчетный период.

Для расчета потерь используют такие общие данные, как длины линий электропередач, их количество, толщина сечений проводов, их температура, средняя плотность тока и другая информация, полученная на основе технических параметров линий электропередач и другого оборудования.

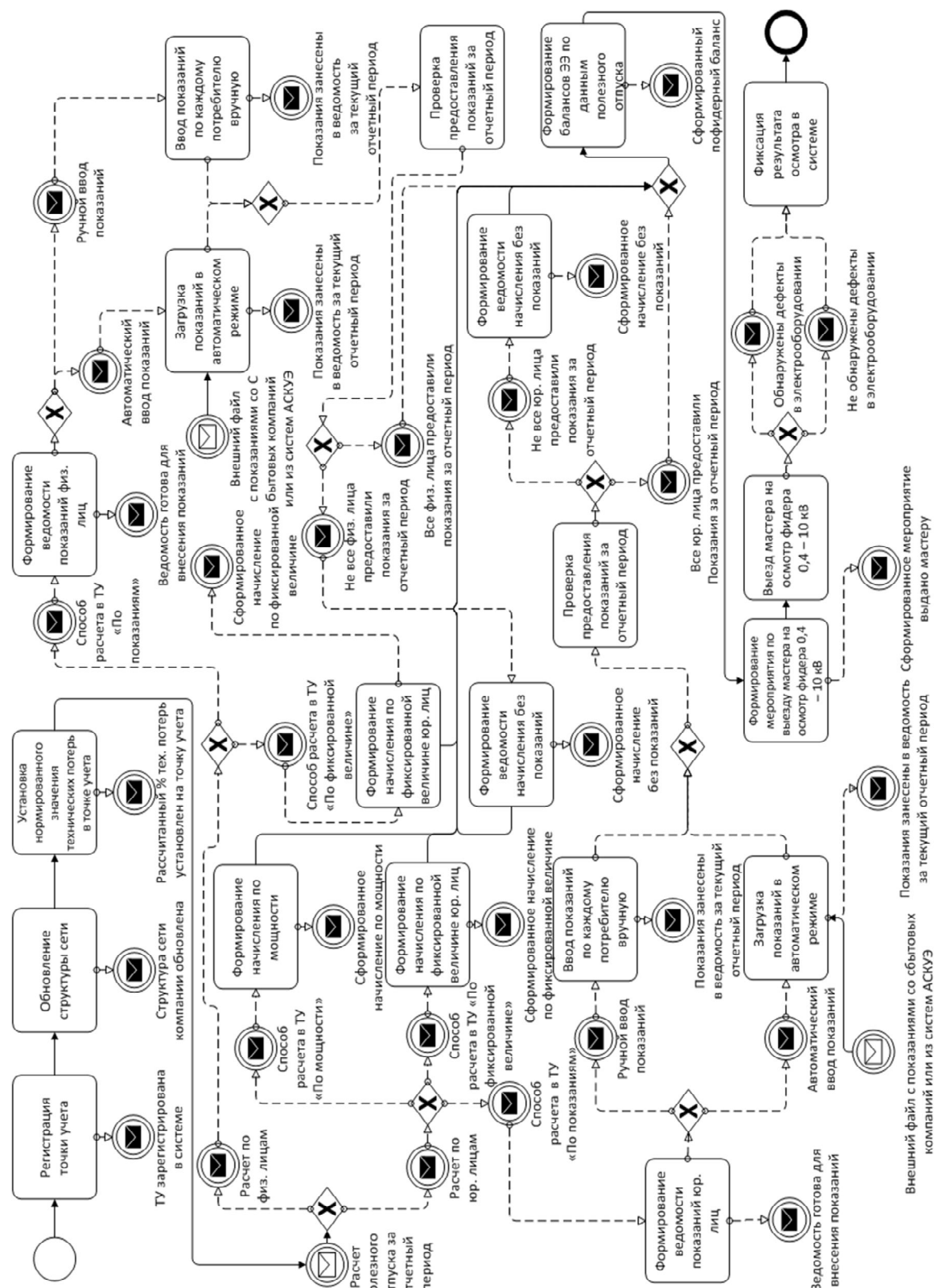


Рис. 1. Схема процесса управления транспортом электроэнергии

С помощью общего интегрального показателя потерь в сетях можно рассчитать точный объем потерь, особенно на участках с напряжением 0,4 – 6/10 кВ, на которых расположена основная масса потребителей электроэнергии (небольшие предприятия и бытовые потребители). Именно у данного класса потребителей ЭСК сложнее всего правильно рассчитывать и контролировать объем технических потерь.

В конце каждого месяца, ЭСК производит расчет полезного отпуска электроэнергии за отчетный период (месяц). Расчеты производятся как для юридических, так и для физических лиц (см. рис. 1). Расчеты полезного отпуска по юридическим лицам производятся тремя способами, которые указываются в точке учета при ее создании: расчет по мощности; расчет по фиксированной величине; расчет по показаниям.

«Расчет по мощности» производится с учетом максимально разрешенной мощности потребления электроустановок на точке учета. В ходе расчета максимальная мощность умножается на количество часов ежедневной работы электроустановок и на количество дней в отчетном периоде. Из полученного объема вычитается фиксированный процент технических потерь.

«Расчет по фиксированной величине» производится с учетом фиксированной величины расходов, определенной в точке учета при ее создании на каждый отчетный период ближайшего года. В ходе расчета из фиксированной

величины вычитается фиксированный процент технических потерь.

«Расчет по показаниям» производится по предоставленным потребителями показаниям, снятым с приборов учета. Расчет может производиться как вручную по каждой точке учета, так и с помощью автоматической загрузки внешнего файла с показаниями. Если показания записываются вручную, то сотрудники ЭСК по каждому потребителю вносят его конечные показания за данный отчетный период. Если имеется внешний файл с показаниями по группе потребителей (данный файл сетевые компании получают от сбытовых компаний или от внешних автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ)), то сотрудники ЭСК загружают данный файл в ведомость, после чего по группе потребителей автоматически проставляются их конечные показания за отчетный период.

Если расчет полезного отпуска осуществлялся по показаниям, то после него проводится проверка предоставления всеми потребителями показаний за текущий отчетный период. В случае выявления факта не предоставления показаний потребителями за данный период, формируется начисление без показаний. В данном начислении для потребителей, не предоставивших вовремя свои показания, показания за данный период будут рассчитаны либо по мощности, либо по методу аналогичного периода прошлого года.

Расчеты полезного отпуска по физическим лицам производятся двумя

способами, которые указываются в точке учета при ее создании: расчет по фиксированной величине; расчет по показаниям.

При расчете «По фиксированной величине» сотрудники ЭСК формируют специальные документы «Начисление по фиксированной величине физ. лиц». Расчет производится аналогично расчету юридических лиц.

При расчете «По показаниям» доступны 2 варианта расчета: вручную или с помощью загрузки внешнего файла с показаниями, полученного от сбытовых компаний или систем АСКУЭ. Для физических лиц данный тип расчета является основным.

После расчета полезного отпуска физических лиц «По показаниям» проводится проверка предоставления потребителями показаний за текущий отчетный период. В случае выявления факта не предоставления показаний потребителями за данный период, формируется начисление без показаний. В данном начислении для потребителей, не предоставивших вовремя свои показания, показания за данный период будут рассчитаны либо по среднему, либо по нормативу.

После проведения расчетов полезного отпуска электроэнергии в каждом отчетном периоде, в ЭСК формируют балансы электроэнергии. Одним из важных балансов является «Пофидерный анализ потребления», позволяющий формировать срез отпущенной и потребленной потребителями электроэнергии

практически по любому уровню структуры сети. Так же в данном отчете отображается уровень технических и коммерческих потерь электроэнергии по каждому уровню структуры сети. Благодаря возможности формирования среза практически по любому уровню структуры сети, руководитель отдела транспорта электроэнергии может отслеживать коммерческие потери вплоть до фидеров низких уровней напряжения (0,4 кВ). Данная информация необходима для дальнейшего формирования мероприятий по выезду мастеров-инженеров на осмотр локализованных участков сети.

После изучения «Пофидерного баланса» формируются мероприятия по выезду мастеров на осмотр локализованных участков сети, где выявлены наибольшие коммерческие потери. Мастера выезжают на эти участки и проверяют питающие элементы сети на исправность, сверяют имеющиеся в базе знаний объемы технических потерь в единицу времени на каждом из оборудовании для определения являются ли выявленные потери коммерческими, или данные потери полностью ложатся на расходы ЭСК из-за выявленных дефектов в элементах электросетевых объектов [9].

По возвращению инженеры отмечают в системе результат осмотра, относя выявленные потери к техническим, либо к коммерческим. Если потери были соотнесены как технические, то данную информацию доводят до других подразделений, которые на ее

основании формируют графики технического осмотра и ремонта оборудования. А если потери соотнесли как коммерческие, то данная информация доводится до других отделов, которые на ее основании формируют собственные графики обходов потребителей по данным локализованным участкам сети.

С вычислительной точки зрения это сложный и трудоемкий процесс, который начинается с установления объема технических потерь на точку учета в момент ее включения, заканчивая формированием среза отпущенной и потребленной

электроэнергии практически по любому уровню напряжения.

Основным источником информации по потребленной электроэнергии являются показания самих потребителей. ЭСК необходимо постоянно фиксировать объемы электроэнергии, переданные потребителям. Но если потребитель не предоставляет показания, ЭСК все равно фиксирует объем электроэнергии, прибегая к расчету объема потребленной электроэнергии по специальному алгоритму.

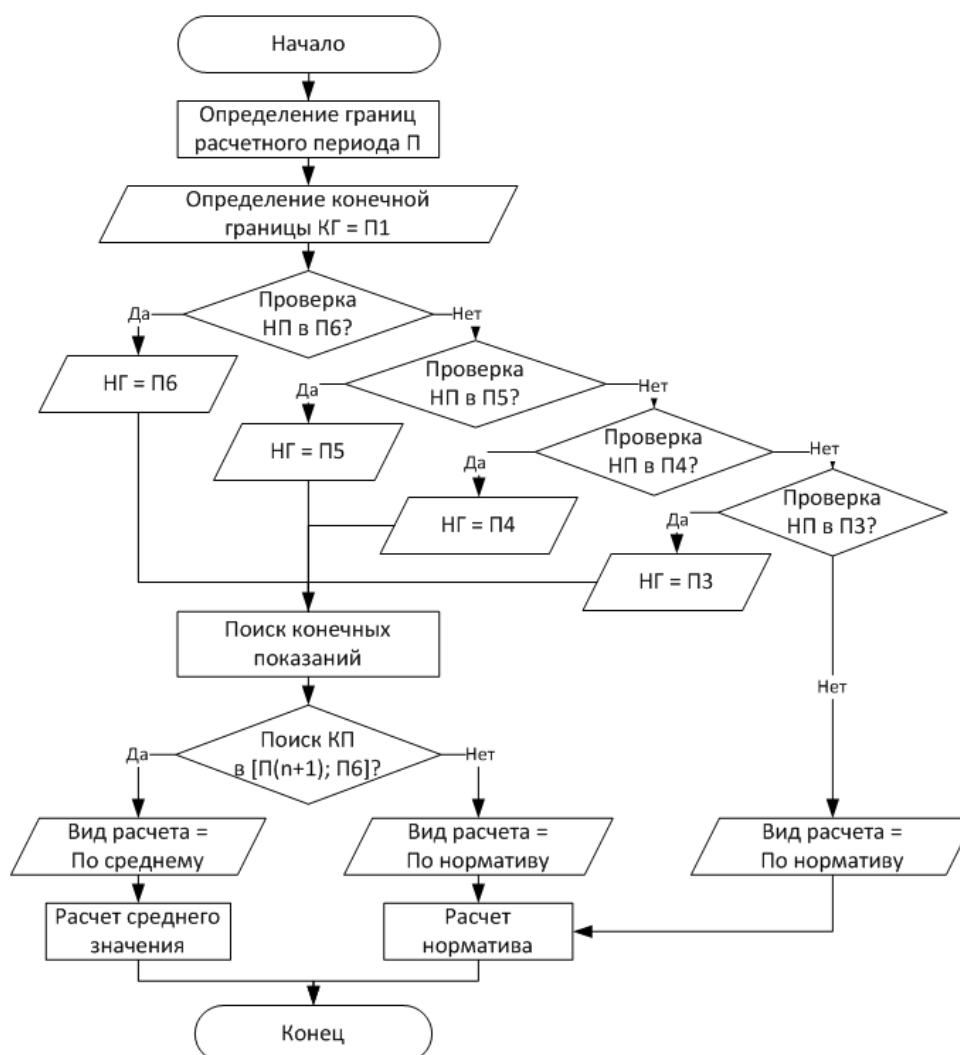


Рис. 2. Алгоритм расчета начисления без показаний по физ. лицам

При создании начисления без показаний по физическим лицам сначала определяются границы периода (П) для расчета. В качестве конечной границы (КГ) устанавливается предыдущий отчетный период (П1). Для определения начальной границы проверяется наличие начальных показаний (НП) за 6-й предыдущий период (П6). Если в периоде есть начальные показания, то период берется в качестве начальной границы (НГ), иначе проверяются периоды «П5», «П4» и «П3». Если начальные показания были найдены, то в качестве начальной границы берется тот период, в котором они были найдены, иначе вид расчета заполняется значением «По нормативу».

После того как были определены начальная и конечная границы осуществляется поиск конечных показаний (КП), начиная от конечного периода в рамках этих границ, без учета периода начальной границы. Если конечные показания не были найдены, то Вид расчета заполняется значением «По нормативу», иначе если конечные показания нашлись – Вид расчета заполняется значением «По среднему».

Далее осуществляется расчет либо «По среднему», либо «По нормативу». Расчет «По нормативу» осуществляется по нормативным показателям, предусмотренным российским законодательством. Расчет «По среднему» ведется по формуле

$$\text{Среднее} = \left(\frac{(КП \cdot КГ - НП \cdot НГ) \cdot \text{Расч.коэф.}}{\sum_{КП}^{НП} П} \right), \quad (4)$$

где КП, КГ – конечные показания конечной границы; НП, НГ – начальные показания начальной границы; Расч. коэф. – расчетный коэффициент, определяемый автоматически для каждого потребителя при создании точки учета; $\sum_{КП}^{НП} П$ – количество периодов между начальными и конечными показаниями. Полученное среднее значение записывается в качестве объема потребленной электроэнергии потребителем за данный отчетный период.

Большинство ЭСК для ведения учета хозяйственной деятельности используют программные продукты, разработанные на платформе «1С:Предприятие 8.3», поэтому автоматизация расчета коммерческих потерь выполнена на этой платформе [10].

В информационной системе реализован иерархичный справочник, хранящий в себе структуру питающих элементов энергосистем и энергообъединений. Справочник необходим для того, чтобы при присоединении нового потребителя к сети, точка учета, соответствующая физическому расположению данного абонента на участке сети, была записана в систему и соотносилась с одним из элементов справочника структуры сети. В системе к одному элементу структуры сети могут быть подвязаны множество потребителей, например, к счетчику одного многоквартирного дома. Чем детальнее будет вестись данный справочник, тем точнее можно локализовать участки потерь.

С помощью данного отчета, способного формировать баланс по раз-

личным уровням структуры сети, можно формировать баланс по самым верхним участкам сети с напряжениями 35-110 кВ, а после углубляться вниз по иерархии, отслеживая полученный небаланс. Если структура сети будет вестись детально, то отчет позволит «проваливаться» на данные уровни структуры сети и отслеживать небаланс по бытовым потребителям, которые составляют «львиную долю» коммерческих потерь, выявляемых ЭСК. Возможности отчета позволят формировать мероприятия по локализованным участкам сети, вплоть до периодической проверки условий работы электросчетчиков расчетного учета у бытовых потребителей.

В состав комплекса технических средств входят: сервер баз данных; кластер серверов 1С:Предприятие 8, веб-сервер, ПК пользователей. Посредством общепринятых стандартов и протоколов передачи данных система позволит осуществлять интеграцию практически с любыми программными продуктами и оборудованием, установленными на предприятии.

Выводы

На основании поставленной задачи была реализована информационная система, позволяющая систематизировать учетные данные и формировать балансы электроэнергии по различным уровням структуры сети. Результатами (срезами данных) отчетов является информация по объему предполагаемых коммерческих потерь на определенных участках сети. Для подтверждения или опровержения в отнесении данных потерь на потребителя реализован механизм мероприятий, позволяющий формировать бригаду мастеров для выезда на осмотр локализованных участков сети, где были выявлены наибольшие коммерческие потери. Фиксация результатов данных осмотров в системе дает не только информацию для других подразделений, ответственных за ремонт и обслуживание оборудования, но и описывает траекторию движения электросетевой компании в стратегии минимизации потерь.

Список литературы

1. Автоматизация расчета потерь электроэнергии в распределительных сетях 10(6) КВ / В.М. Кутин, В.В. Кулик, Д.С. Пискарьов, Е.В. Лонская // Научные труды Винницкого национального технического университета. 2008. № 3. С. 1-8.
2. Шавалеев И.Р. Алгоритм расчета потерь электроэнергии с помощью АИИС КУЭ // Новая наука: Проблемы и перспективы. 2016. № 6-2 (85). С. 259-262.
3. Мирошник А.А. Уточненные алгоритмы расчета потерь электроэнергии в сетях 0,38 Кв в реальном времени // Проблемы региональной энергетики. 2010. № 2. С. 35-42.
4. Войтов О.Н., Голуб И.И., Семенова Л.В. Алгоритмы определения потерь электроэнергии электрической сети // Электричество. 2010. № 9. С. 38-45.

5. Герасименко А.А., Пузырев Е.В. Комбинированное объединение детерминированного и стохастического методов в алгоритме расчёта потерь электроэнергии // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2017. № 3. С. 12-16.

6. Кольцов Ю.В., Бобошко Е.В. Сравнительный анализ нейросетевых архитектур и алгоритмов обучения для задачи прогнозирования потерь электроэнергии // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2012. № 6. С. 55-61.

7. Состав и классификация потерь электроэнергии при ее передаче / В.К. Севек, К.Б.О. Сагааноол, Ч.С. Манчык-Сат, Р.М. Севек // Вестник Тувинского государственного университета. №3 Технические и физико-математические науки. 2014. № 3 (22). С. 124-130.

8. Афоничкин А. И., Михаленко Д. Г. Управленческие решения в экономических системах.. СПб. : Питер, 2009. 480 с.

9. Система идентификации дефектов технологического оборудования объектов энергетики / О.М. Проталинский, А.В. Андрюшин, И.А. Щербатов, И.О. Проталинский // Энергосбережение и водоподготовка. 2018. № 5 (115). С. 56-63.

10. Проталинский О.М., Проталинская Ю.О. ERP-система управления деятельностью распределительной сетевой компании // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2016. № 5 (82). С. 10-12.

Поступила в редакцию 26.02.2019

Подписана в печать 15.03.2019

Reference

1. Kutin V.M., Kulik V.V., Pisklyarov D.S., Lonskaya E.V. Avtomatizaciya rascheta poter' elektroenergii v raspredelitel'nyh setyah 10(6) KV. *Nauchnye trudy Vinnickogo nacionalnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, no.3, pp. 1-8 (In Russ.).

2. Shavaleev I.R. Algoritm rascheta poter' elektroenergii s pomoshch'yu AIIS KUE. *Novaya nauka: Problemy i perspektivy*, 2016, no. 6-2 (85), pp. 259-262 (In Russ.).

3. Miroshnik A.A. Utochnennye algoritmy rascheta poter elektroenergii v setyah 0,38 Kv v realnom vremeni. *Problemy regionalnoj energetiki*, 2010, no. 2, pp. 35-42 (In Russ.).

4. Vojtov O.N., Golub I.I., Semenova L.V. Algoritmy opredeleniya poter' elektroenergii elektricheskoy seti. *Elektrichestvo*, 2010, no. 9, pp. 38-45 (In Russ.).

5. Gerasimenko A.A., Puzyrev E.V. Kombinirovannoe obedinenie determinirovannogo i stohasticheskogo metodov v algoritme raschyota poter elektroenergii. *Elektro. Elektrotekhnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost*, 2017, no. 3, pp. 12-16 (In Russ.).

6. Kolcov YU.V., Boboshko E.V. Sravnitelnyj analiz nejrosetevyh arhitektur i algoritmov obucheniya dlya zadachi prognozirovaniya poter elektroenergii. *Nejrokompyutery: razrabotka, primeneniye*, 2012, no. 6, pp. 55-61 (In Russ.).

7. Sevek V.K., Saganool K.B.O., Manchyk-Sat CH.S., Sevek R.M. Sostav i klassifikaciya poter' elektroenergii pri ee peredache. *Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. №3 Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki*, 2014, no. 3 (22), pp. 124-130 (In Russ.).

8. Afonichkin A. I., Mihalenko D. G. Upravlencheskie resheniya v ekonomicheskikh sistemah. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2011. 480 p. (In Russ.).

9. Protalinskij O.M., Andryushin A.V., Shcherbatov I.A., Protalinskij I.O. Sistema identifikacii defektov tekhnologicheskogo oborudovaniya obektov energetiki. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2018, no. 5 (115), pp. 56-63 (In Russ.).

10. Protalinskij O.M., Protalinskaya YU.O. ERP-sistema upravleniya deyatel'nost'yu raspredelitel'noj setевой kompanii. *Avtomatizaciya i IT v energetike*, 2016, no. 5 (82), pp. 10-12 (In Russ.).

Received 26.02.2019

Accepted 15.03.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Игорь Игоревич Степанов, магистрант, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», г. Астрахань, Российская Федерация, e-mail: stepanovigor.91@gmail.com

Igor I. Stepanov, Under-Graduate Student, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation, e-mail: stepanovigor.91@gmail.com

Наталья Павловна Ганюкова, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», г. Астрахань, Российская Федерация, e-mail: gannatasha@yandex.ru

Natalya P. Ganyukova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation, e-mail: gannatasha@yandex.ru

Анна Алексеевна Ханова, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», г. Астрахань, Российская Федерация, e-mail: akhanova@mail.ru

Anna A. Khanova, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation, e-mail: akhanova@mail.ru

Реконфигурируемая вычислительная модульная система

С.С. Шевелев

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94

✉ e-mail: schewelew@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Реконфигурируемая вычислительная система имеет вычислительные комплексы и специализированные ЭВМ, которые используются при решении задач векторной и матричной алгебры, распознавания образов. Различают матричные и ассоциативные системы, нейронные сети. Матричные вычислительные системы состоят из множества процессорных элементов, соединенных через коммутационное устройство с многомодульной памятью. Они предназначены для решения задач над векторами, матрицами и массивами данных. Ассоциативные системы содержат большое число операционных устройств, способных одновременно вести обработку нескольких потоков данных. Нейронные сети и нейрокомпьютеры имеют высокую производительность при решении задач экспертных систем, распознавания образов за счет параллельной обработки нейросети.

Методы. Построен информационный граф вычислительного процесса модульной системы с перестраиваемой структурой. Разработаны структурные и функциональные схемы, алгоритмы, реализующие построение специализированных модулей для выполнения арифметических и логических операций, поисковых операций и функций замены вхождений в обрабатываемых словах. Разработано программное обеспечение моделирования работы арифметико-символьного процессора, специализированных вычислительных модулей, систем коммутаций.

Результаты. Разработана структурная схема реконфигурируемой вычислительной модульной системы, которая состоит из совместимых функциональных модулей, она способна к статической и динамической реконфигурации, имеет параллельную структуру соединения процессора и вычислительных модулей за счет использования интерфейсных каналов. Система состоит из арифметико-символьного процессора, специализированных вычислительных модулей и систем коммутаций, выполняет специфические задачи символьной обработки информации, арифметические и логические операции.

Заключение. Системы с перестраиваемой структурой представляют собой высокопроизводительные и высоконадежные вычислительные системы, которые состоят из объединенных процессоров в многомашинные и многопроцессорные комплексы. Перестраиваемость структуры обеспечивает высокую производительность системы за счет ее адаптации к вычислительным процессам и составу обрабатываемых задач.

Ключевые слова: информационный граф; параллельно-конвейерная структура; модульная система; специализированные вычислительные блоки.

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

Для цитирования: Шевелев С.С. Реконфигурируемая вычислительная модульная система // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 137-152. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-137-152.

Reconfigurable Modular Computing System

Sergey S. Schevelev

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

✉ e-mail: schewelew@mail.ru

Abstract

Purpose of research. A reconfigurable computer system consists of a computing system and special-purpose computers that are used to solve the tasks of vector and matrix algebra, pattern recognition. There are distinctions between matrix and associative systems, neural networks. Matrix computing systems comprise a set of processor units connected through a switching device with multi-module memory. They are designed to solve vector, matrix and data array problems. Associative systems contain a large number of operating devices that can simultaneously process multiple data streams. Neural networks and neurocomputers have high performance when solving problems of expert systems, pattern recognition due to parallel processing of a neural network.

Methods. An information graph of the computational process of a reconfigurable modular system was plotted. Structural and functional schemes, algorithms that implement the construction of specialized modules for performing arithmetic and logical operations, search operations and functions for replacing occurrences in processed words were developed. Software for modelling the operation of the arithmetic-symbol processor, specialized computing modules, and switching systems was developed.

Results. A block diagram of a reconfigurable computing modular system was developed. The system consists of compatible functional modules and is capable of static and dynamic reconfiguration, has a parallel connection structure of the processor and computing modules through the use of interface channels. It consists of an arithmetic-symbol processor, specialized computing modules and switching systems; it performs specific tasks of symbolic information processing, arithmetic and logical operations.

Conclusion. Systems with a reconfigurable structure are high-performance and highly reliable computing systems that consist of integrated processors in multi-machine and multiprocessor systems. Reconfigurability of the structure provides high system performance due to its adaptation to computational processes and the composition of the processed tasks.

Keywords: block diagram; parallel-pipeline structure; modular system; special-purpose computing units.

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

For citation: Schevelev S. S. Reconfigurable Modular Computing System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(2): 137-152 (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-137-152.

Введение

Идея концепции построения реконфигурируемых вычислительных систем заключается в аппаратной реализации всех операций, предписанных вершинами информационного графа за-

дачи, всех каналов передачи данных между вершинами, соответствующими дугам графа, и всех информационных каналов, соответствующих входным и выходным вершинам. Задача, определенная информационным графом, будет

выполнена максимально быстро, поскольку обеспечивается максимально возможное распараллеливание вычислений. Информационный граф большой задачи сегментируется на фрагменты – непересекающиеся базовые подграфы, физически реализуемые в аппаратуре реконфигурируемых вычислительных систем.

Основными вычислительными блоками в реконфигурируемой вычислительной системе являются макропроцессоры, которые позволяют реализовать операции, предписанные вершинами информационного графа. Макропроцессор представляет собой некоторый набор элементарных процессоров, объединяемых в единый программно-неделимый вычислительный ресурс с помощью локального пространственного коммутатора. Для реализации информационного графа решаемой задачи макропроцессоры должны иметь возможность соединения в вычислительные параллельно-конвейерные структуры с помощью системного коммутатора, который обеспечивает различные варианты соединения макропроцессоров друг с другом. В состав системы входит распределенная память, обеспечивающая возможности параллельной выдачи массивов входных данных на входы макропроцессоров и записи результатов вычислений с их выходов [1].

Материалы и методы решения задачи

Граф $G(S, F)$ (рис. 1) называется информационным графом вычисли-

тельной открытой развиваемой асинхронной модульной системы, или графом алгоритма решения задачи. Граф $G(S, F)$ содержит множество вершин $s_i \in S$, каждой из которых приписана некоторая операция O_i , принадлежащая множеству допустимых операций O . Дуги $f(s_i, s_{i+1}) \in F$ определяют последовательность выполнения операций, приписанных вершинам графа, причем если две вершины s_i и s_{i+1} соединены дугой $f(s_i, s_{i+1})$, то это означает, что результат операции O_i является входным данным для операции O_{i+1} . Граф $G(S, F)$ имеет также множество входных дуг $f(s_{0i}, s_i)$, определяющих блоком входных данных, а также выходных дуг $f(s_i, s_k)$, определяющих хранение результатов ее решения.

Множество вершин S определяется множеством процессоров вычислительной открытой асинхронной системы. Множество дуг f представляет собой множество каналов коммуникаций между процессорами. Входные и выходные дуги графа $G(S, F)$ определяются каналами связи с источником входных и приемником выходных данных, в частности, с памятью системы. Операции O_i из множества допустимых операций O реализуются в процессорах вычислительной системы в форме последовательных процедур обработки данных.

Вычислительную открытую развиваемую асинхронную модульную систему можно представить как иерархию универсальной ЭВМ, систему специализированных вычислительных модулей и гибкую подсистему интерфейсных кана-

специализированные модули: СПЕЦ МОД1 выполняет операции по символьной обработке, СПЕЦ МОД2 осуществляет сортировку слов входного текста, СПЕЦ МОД3 решает задачу распределения ресурсов со многими параметрами между локализованными центрами, СПЕЦ МОД4 выполняет арифметическую операцию сложения чисел. СПЕЦ МОД5 выполняет сортировку двоичной информации.

Семейство высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем с динамически перестраиваемой, программируемой архитектурой на основе реконфигурируемой элементной базы является конкурентоспособной альтернативой традиционной организации многопроцессорных систем, основанных на использовании микропроцессоров в качестве основного вычислительного элемента.

Вычислительная открытая развиваемая асинхронная модульная система сочетает в себе как последовательный, так и конвейерный способ обработки информации, поскольку входные данные обрабатываются одновременно по разным конвейерным цепочкам процессоров.

Основными вычислительными блоками в реконфигурируемой вычислительной системе являются макропроцессоры, которые позволяют реализовать операции, предписанные вершинами информационного графа. Макро-

процессоры соединяются в вычислительные параллельно-конвейерные структуры с помощью системного коммутатора, который обеспечивает различные варианты соединения вычислительных модулей друг с другом. В состав системы входит распределенная память, обеспечивающая параллельную выдачу массивов входных данных на входы макропроцессоров и записи результатов вычислений с их выходов.

Для решения этой задачи можно использовать блок выполнения логических операций с последовательной архитектурой, основными элементами которого являются элементарные вычислители, выполняющие логические операции: $\{\&, \vee, \neg\}$, $\{\&, \neg\}$, $\{\vee, \neg\}$, $\{\&, \oplus, 1\}$, которые относятся к функционально полной системе булевых функций.

К множеству микроопераций $L = \{L_{12}, L, \dots, L_{1z}\}$, выполняемых блоком логических операций S_3 , относятся: инверсия $L_{12} \div g = \bigwedge_{i=1}^n \bar{a}_i$, конъюнкция $L_{12} \div g = \bigwedge_{i=1}^n (a_i b_i)$, дизъюнкция $L_{12} \div g = \bigvee_{i=1}^n (a_i b_i)$, исключающее ИЛИ $L_{12} \div g = \bigoplus_{i=1}^n (a_i b_i)$, $g_i \in \{0, 1\}$; $a_i \in \{0, 1\}$; $b_i \in \{0, 1\}$, эквивалентность $L_{12} \div g = \bigwedge_{i=1}^n \sim (a_i b_i)$, $g_i \in \{0, 1\}$; $a_i \in \{0, 1\}$; $b_i \in \{0, 1\}$.

На рис. 3 представлены: блок ввода данных БВД, система электронных ключей СиК, элементарные вычислители логических операций ЭлВ, блок хранения результатов БХР.

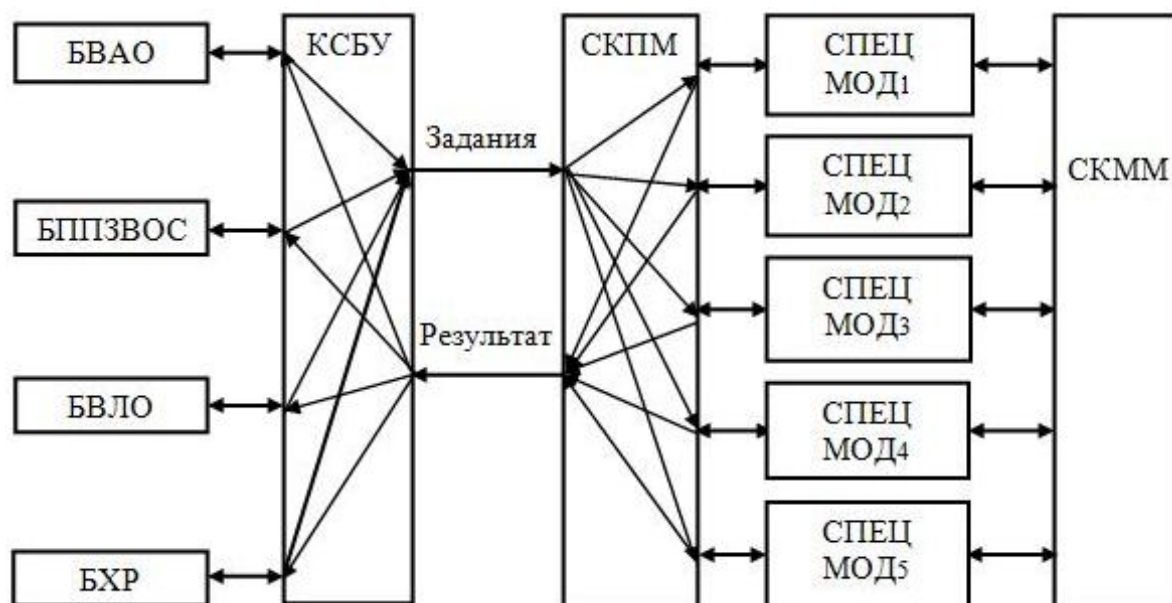


Рис. 2. Граф вычислительного процесса вычислительной открытой развиваемой асинхронной модульной системы VORAMS

Время результата T_{noc} обработки N векторов входных данных определяется по формуле

$$T_{\text{noc}} = N * (t_{\text{БВД}} + t_{\text{Сик}} + t_{\text{ЭЛВ}} + t_{\text{БХР}}) = N \sum_{i=1}^M s(O_i) \cdot \tau, \quad (1)$$

где $t_{\text{БВД}}$, $t_{\text{Сик}}$, $t_{\text{ЭЛВ}}$, $t_{\text{БХР}}$ – время обработки данных блоками устройства; M – число вершин на графе $G(S, F)$; $s(O_i)$ – число тактов работы блока устройства при выполнении операции O_i , соответствующей вершине графа $G(S, F)$, τ – продолжительность такта.

Сокращение времени $T_{\text{нар}}$ обработки потока входных векторов является распараллеливанием процесса обработки. В этом случае параллельный способ подразумевает наличие K процессоров P_i ($i = 1, 2, \dots, K$), каждый из которых

может работать независимо от других процессоров. Каждый из процессоров P_i ($i = 1, 2, \dots, K$) запрограммирован на реализацию графа $G(S, F)$. Множество входных векторов Z_i ($i = 1, 2, \dots, N$) разбивается на (N/K) непересекающихся подмножеств, каждое из этих подмножеств входных векторов может быть обработано на процессоре P_i независимо, то есть параллельно с другими подмножествами.

Для решения этой задачи можно использовать блок выполнения математических операций в форматах с фиксированной и плавающей запятой с параллельной архитектурой (рис. 4), основными элементами которого являются математические вычислители, выполняющие арифметические и сдвиговые операции.

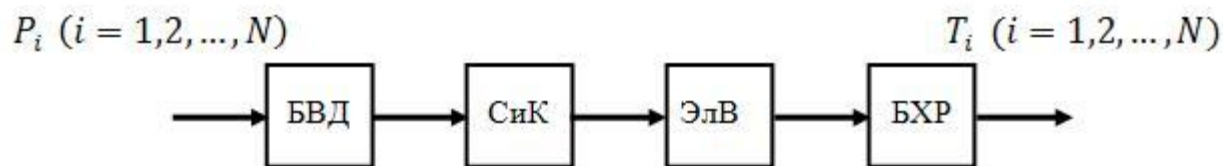


Рис. 3. Блоки выполнения логических операций с последовательной архитектурой

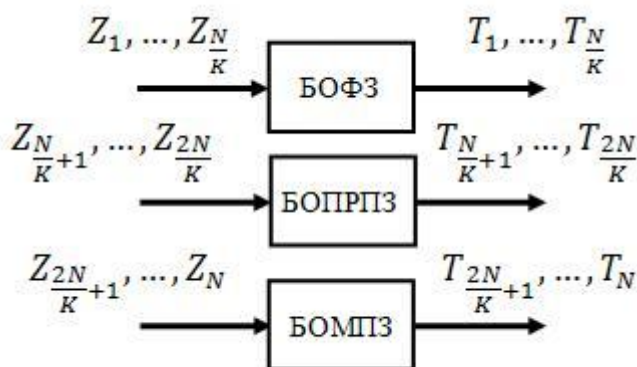


Рис. 4. Параллельный способ обработки векторов входных данных

К множеству микроопераций $R = \{R_{12}, R_{13}, \dots, R_{1k}\}$, выполняемых блоком арифметических операций S_1 , относятся: суммирования $R_{12} = \sum_{i=1}^n (a_i b_i)$, вычитания $R_{13} = \sum_{i=1}^n (a_i - b_i)$, произведения $R_{13} = \prod_{i=1}^n (a_i b_i)$, деления $R_{14} = \prod_{i=1}^n (a_i / b_i)$ в формате с фиксированной запятой и

$$R_{12} = \sum_{i=1}^n (a_i 2^x b_i 2^m),$$

$$R_{13} = \sum_{i=1}^n (a_i 2^x - b_i 2^m),$$

$$R_{13} = \prod_{i=1}^n (a_i 2^x b_i 2^m),$$

$$R_{14} = \prod_{i=1}^n (a_i 2^x / b_i 2^m)$$

в формате с плавающей запятой.

В этом случае время получения результата $T_{пар}$, при обработке всего множества векторов входных данных, будет вычисляться по формуле

$$T_{пар} = \left(\frac{N}{K}\right) \cdot (t_{БОФЗ} + t_{БОПРПЗ} + t_{БОМПЗ}) = \left(\frac{N}{K}\right) \sum_{i=1}^M s(O_i) \cdot \tau. \quad (2)$$

Время обработки потока сокращается в K раз по сравнению с последовательной обработкой всех входных векторов.

К множеству микроопераций $C = \{C_{12}, C, \dots, C_{1t}\}$, выполняемых блоком параллельного поиска и замены в обрабатываемых словах S_2 относятся: левая конкатенация β и α цепочек $\alpha = d_1 d_2 \dots d_k$ и $\beta = b_1 b_2 \dots b_l$ символы одного этого же алфавита V , $d_i \in V$, $\forall i = 1, \dots, k$ и $b_j \in V$, $\forall j = 1, \dots, l$, равна $\gamma = b_1 b_2 \dots b_l d_1 d_2 \dots d_k$, правая конкатенация цепочек α и β принимает вид $\gamma = d_1 d_2 \dots d_k b_1 b_2 \dots b_l$ над тем же алфавитом V .

Блок выполняет операцию параллельного поиска вхождений в обрабатываемых словах. Требуется найти все вхождения $x = b_1 \dots b_m$ в слове

$w = a_1 \dots a_n$ в качестве подстроки. Определить все смещения s , для которых подстрока $w_s = a_{s+1} \dots a_{s+m}$ совпадает с $b_1 \dots b_m$. Для поиска вычисляется функция

$$F = (a_1 \sim b_1) \& (a_2 \sim b_2) \& \dots \& (a_m \sim b_m).$$

Если функция F равна нулю, то вхождение и фрагмент слова не совпадают. В этом случае формируется сдвиг символов слова влево на один разряд. Операция сравнения продолжается. Если F равно единице, то вхождение найдено в слове. Смещение s определяет позицию вхождения в слове, сдвиг символов слова осуществляется на m позиций влево [3].

В блоке выполняется операция замены вхождений в обрабатываемом слове, которая задается формулой подстановки. Применяя конечный упорядоченный набор формул подстановки к обрабатываемому слову w :

$$\begin{cases} a_{s+1} \rightarrow \beta_1 \\ \dots \\ a_{s+m} \rightarrow \beta_k, \end{cases} \quad (k \geq 1) \quad (3)$$

получаем новое слово $w' = a_1 \dots a_s \beta_1 \beta_2 \dots \beta_k a_{s+m+1} \dots a_n$.

Если это слово взять за исходное и применить те же процедуры, то получа-

ется новое слово w'' и так далее $w \rightarrow w' \rightarrow w'' \rightarrow \dots$

Быстродействие конвейера при длительной работе будет значительно превышать быстродействие, которое достигается при последовательной обработке команд. Это увеличение будет тем больше, чем меньше длительность такта конвейера и чем больше количество выполненных за исследуемый период команд.

В блоке параллельного поиска и замены в обрабатываемых словах вычислительной системы можно использовать конвейерную обработку. Блок имеет 4 элементарных процессора P_i ($i = 1, 2, 3, 4$), соединенных в цепочку, как показано на рис. 5, каждый из элементарных процессоров P_i запрограммирован на реализацию соответствующего подграфа $G_i(S_i, F_i)$ ($i = 1, 2, 3, 4$) общего графа алгоритма $G(S, F)$. На рис. 5 представлены процессоры: памяти вхождений и обрабатываемых слов БПВС, сравнения и анализа вхождений в обрабатываемых словах БАВС, замены вхождений в обрабатываемых словах БЗАМ, хранения результатов подстановок БХРП.

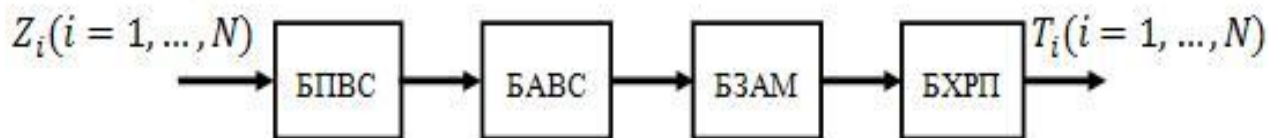


Рис. 5. Конвейерная организация работы блока параллельного поиска и замены в обрабатываемых словах

Длительность такта T_{max} будет равна длительности самого медленного этапа обработки – блока сравнения и анализа вхождений в обрабатываемых словах БАВС.

$$T = \max \{T_{БПВС}, T_{БАВС}, T_{БЗАМ}, T_{БХРП}\} = T_{БАВС}. \quad (4)$$

Время $T_{кон}$ при конвейерной обработке N команд будет вычисляться следующей формулой:

$$T_{кон} = P \cdot T_{БАВС} + (N - 1) \cdot T_{БАВС} = T_{БАВС} \cdot (P + (N - 1)), \quad (5)$$

где P – число элементарных процессоров, $T_{БАВС}$ – самый максимальный по времени этап обработки данных.

Реконфигурируемые вычислительные системы с динамически перестраиваемой архитектурой превосходят по технико-экономическим характеристикам многопроцессорные вычислительные системы с традиционной архитектурой в сегментах рынка суперЭВМ и рабочих станций, а также ускорителей к персональному компьютеру.

Сравнительный анализ времени и скорости конвейерной и последовательной архитектур на примере работы блока параллельного поиска и замены в обрабатываемых словах вычислительной системы.

Время и скорость при последовательной организации работы блока вычислительной системы $T_{пос}$ и $V_{пос}$ определяются по формулам:

$$T_{пос} = N \cdot (\tau_1 + \tau_{max} + \tau_3 + \tau_4),$$

$$V_{пос} = \frac{1}{(\sum_{i=1}^4 \tau_i)} = \frac{1}{(\tau_1 + \tau_{max} + \tau_3 + \tau_4)}. \quad (6)$$

Время $T_{кон}$ и скорость $V_{кон}$ конвейерной организации работы блока параллельного поиска и замены в обрабаты-

ваемых словах определяются из отношений:

$$T_{кон} = (N + 4 - 1) \cdot \tau_{max} = (N + 3) \cdot \tau_{max},$$

$$V_{кон} = (\tau_{max})^{-1} = \frac{1}{\tau_{max}}. \quad (7)$$

Отношение времени последовательной организации вычислительного процесса $T_{пос}$ к конвейерной $T_{кон}$ будет определяться как

$$\frac{T_{пос}}{T_{кон}} = \frac{\tau_1 + \tau_{max} + \tau_3 + \tau_4}{\tau_{max}} \approx \frac{4 \cdot \tau_{max}}{\tau_{max}} = 4. \quad (8)$$

Отношение скорости конвейерной $V_{кон}$ к последовательной $V_{пос}$ определится как

$$\frac{V_{кон}}{V_{пос}} = \frac{\tau_1 + \tau_{max} + \tau_3 + \tau_4}{\tau_{max}} \approx \frac{4 \cdot \tau_{max}}{\tau_{max}} = 4. \quad (9)$$

При большом значении числа входных векторов N конвейерная организация вычислительного процесса требует меньше времени, а скорость будет больше, чем последовательная более чем в 4 раза, где 4 – число элементарных процессоров в конвейерной цепочке блока. Эффективность архитектуры конвейерной организации вычислительного процесса по сравнению с последовательной приблизительно в H раз выше, где H – число процессоров в цепочке [4].

Время выполнения операции блоком параллельного поиска и замены в обрабатываемых словах конвейерной и последовательной архитектур приведены в таблице.

Сравнительный анализ времени конвейерной и последовательной архитектур. Изображенный график на рис.6 иллюстрирует разницу в эффективности архитектуры конвейерной организации вычислительного процесса по сравнению с последовательной.

Время определения поиска и замены в словах

Число входных векторов N	1	5	10	15	20
Время $T_{\text{пос}} \text{ нс}$	500	2500	5000	7500	10000
Время $T_{\text{кон}} \text{ нс}$	800	1600	2600	3600	4600

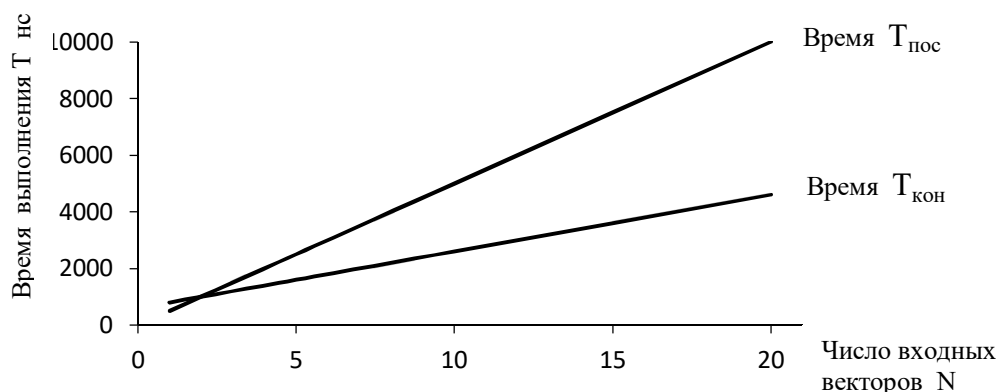


Рис. 6. График сравнения времени конвейерной и последовательной архитектур

Важным компонентом массово-параллельных компьютеров является коммуникационная среда. Это набор аппаратных и программных средств, обеспечивающих обмен сообщениями между процессорами. Она предназначена для достижения высоких скоростей передачи с малым временем задержки и при этом обеспечивает масштабируемую архитектуру, позволяющую строить системы, состоящие из множества блоков.

Система коммутации процессор–модуль обеспечивает передачу информации от арифметико-символьного процессора на входы специализированных вычислительных модулей системы в виде заданий, а также формирует интерфейсный канал процессор-модуль передачи информации с выходов специ-

ализированных вычислительных модулей системы в виде результата для хранения его в памяти арифметико-символьного процессора.

Система коммутации модуль–модуль обеспечивает передачу информации с выходов специализированных вычислительных модулей на входы других специализированных вычислительных модулей системы в виде заданий и результатов, а также формирует интерфейсный канал передачи информации с выходов специализированных вычислительных модулей системы в виде результатов для хранения их в памяти арифметико-символьного процессора [5].

Специализированный вычислительный модуль СпецВычМод1 выполняет операции поиска вхождений в обрабатываемых словах (рис. 7).

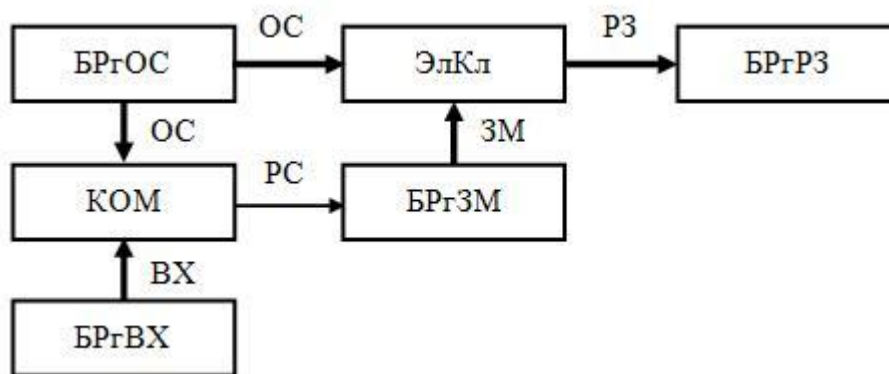


Рис. 7. Специализированный вычислительный модуль СпецВычМод1: БРгОС – блок регистра обрабатываемого слова; БРгВХ – блок регистра вхождений; БРгЗМ – блок регистра замены; КОМ – компаратор; БРгРЗ – блок регистр результата замены; ЭлКл – схема электронных ключей

Первый формат работы устройства определяет вхождения, которые имеют одинаковые части. Это означает, что предыдущие вхождения и последующие имеют общую часть, состоящую из одной буквы или цепочки символов. Второй формат работы системы характеризуется определением вхождений, не имеющих общих частей. В этом случае определяется адрес только через n сдвигов, где n – количество букв в регистре вхождения. Если необходимо произвести замену найденного вхождения на подстановку буквы или слово, заранее определенную и записанную в регистр подстановок. В этом случае, вначале осуществляется операция поиска вхождений без общих частей, затем производится операция замены найденного вхождения на подстановку. Процедуры сдвига возможны при помощи реверсивных регистров, которые осуществляют сдвиг информации как влево, так и вправо. В параллельной системе поиска и замены осуществляется процесс обработки информации сразу с не-

сколькими словами и несколькими вхождениями в параллельном формате. Для выполнения параллельной обработки в системе имеются n -блоков поиска и замены [7].

Специализированный вычислительный модуль СпецВычМод2 выполняет операцию сортировки слов с помощью ассоциативного запоминающего устройства (рис. 8). Поиск слов в памяти происходит по содержанию. В ассоциативном запоминающем устройстве для обработки данных используются последовательные алгоритмы, поиск осуществляется параллельно по словам и последовательно – по разрядам. Это позволяет проводить операции на равенство искомых слов, равных заданному признаку. В режиме поиска АЗУ считываются из памяти все слова, подчиняющиеся определенным условиям: равные, больше или меньше, поиск минимального, максимального значения, поиск величин, заключенных в заданном интервале, упорядоченная сортировка [7].

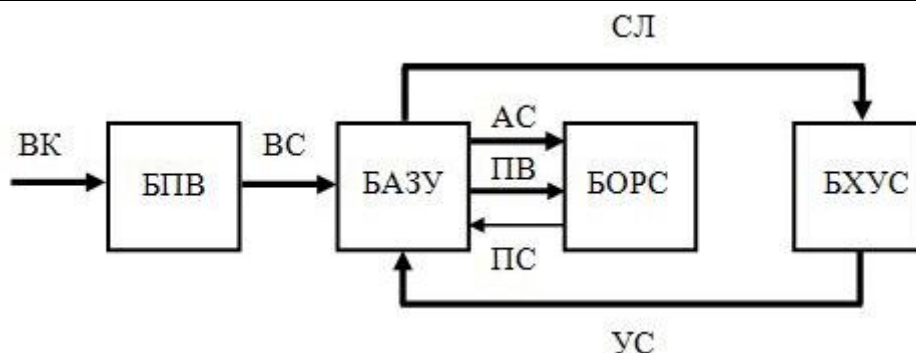


Рис. 8. Специализированный вычислительный модуль СпецВычМод2: БПВ – блок поиска вхождений; БАЗУ – блок ассоциативных запоминающих устройств; БОРС – блок обработки результатов сравнения; БХУС – блок хранения упорядоченных слов

Специализированный вычислительный модуль СпецВычМод3 формирует режимы управления материальными потоками или информацией, которые обеспечивают оптимальное сбалансированное функционирование системы взаимодействующих локализованных узлов по многим ресурсам и параметрам (рис. 9).

Локализованные центры системы служат для формирования избыточного ресурса, который необходимо распределить по ассоциативным запоминающим устройствам других блоков, а также для получения адреса хранения и анализа определенного количества ресурса, полученного от других блоков. Система распределения ресурсов определяет "свободные" места в ассоциативных запоминающих устройствах избыточных ресурсов и их параметров. Процесс передачи избытка на свободные места произойдет тогда, когда объемы избыточных ресурсов и параметров равны или меньше предоставленных объемов "свободных" мест [8].

Специализированный вычислительный модуль СпецВычМод4 выполняет

микрооперацию сложения чисел в троичной системе счисления (рис. 10).

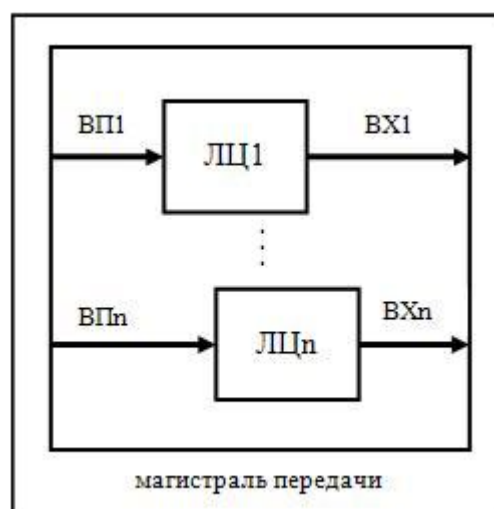


Рис. 9. Специализированный вычислительный модуль СпецВычМод3: ЛЦn – локализованные центры системы распределения; магистраль передачи

Использование троичной системы счисления обосновывается следующим результатом. При сложении младших разрядов A_0 и B_0 , старших A_1 и B_1 разрядов и переносов из младших разрядов в старшие P_{00} , P_{01} формируются суммы Σ_0 , Σ_1 и переносы P_0 , P_1 , $A_1 \in \{0, 1\}$; $B_1 \in \{0, 1\}$. Сигналы Σ_{10} и Σ_{11} представляют младший и старший разряды окончательной суммы [9].

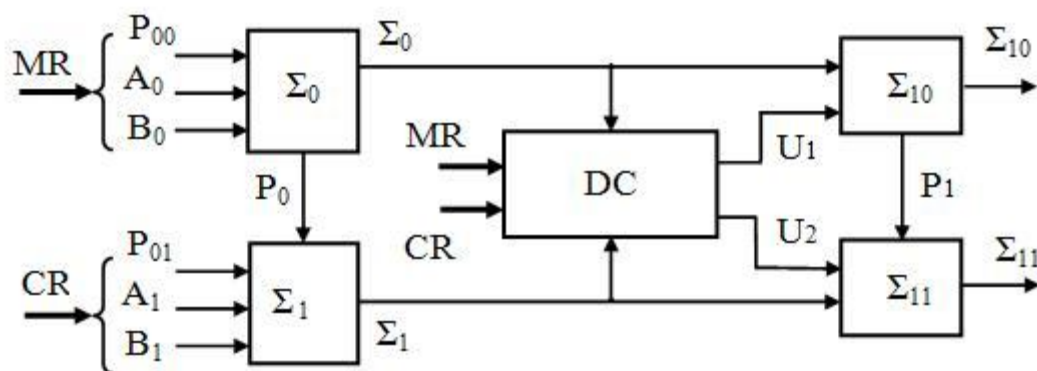


Рис. 10. Специализированный вычислительный модуль СпецВычМод4

$$\Sigma_0 = \bigoplus_{i=1}^3 (A_0 B_0 P_{00}), \quad \Sigma_0 \in \{0, 1\};$$

$$A_0 \in \{0, 1\}; B_0 \in \{0, 1\}; P_{00} \in \{0, 1\}; \quad (10)$$

$$\Sigma_1 = (\bigoplus_{i=1}^2 (P_0 P_{01}) \oplus (\bigoplus_{i=1}^2 (A_1 B_1))), \quad \Sigma_1 \in \{0, 1\};$$

$$P_0 \in \{0, 1\}; P_{01} \in \{0, 1\}; \quad (11)$$

$$\Sigma_{10} = \bigoplus_{i=1}^2 (\Sigma_0 U_1), \quad \Sigma_{10} \in \{0, 1\};$$

$$\Sigma_0 \in \{0, 1\}; U_1 \in \{0, 1\}; \quad (12)$$

$$\Sigma_{11} = \bigoplus_{i=1}^3 (P_1 \Sigma_1 U_2),$$

$$\Sigma_{11} \in \{0, 1\}; P_1 \in \{0, 1\};$$

$$\Sigma_1 \in \{0, 1\}; U_2 \in \{0, 1\}. \quad (13)$$

Специализированный вычислительный модуль СпецВычМод5 выполняет сортировку информации методом преобразования данных в адрес (рис. 11). Входные данные поступают одновременно на информационные и адресные

входы оперативных запоминающих устройств. По сформированным адресам данные и числа одинаковых символов и чисел записываются в оперативную память устройства. Преобразование данных в адрес происходит с помощью хеш-функции, которая отображает каждый ключ из набора S во множество целых чисел без коллизий. Инъективное отображение для целого описывается функцией $h(k): U \rightarrow [m]$, она является k -идеальной хеш-функцией для $S \subseteq U$, если для каждого $j \in [m]$ имеем $|\{x \in S | h(x) = j\}| \leq k$ [10].

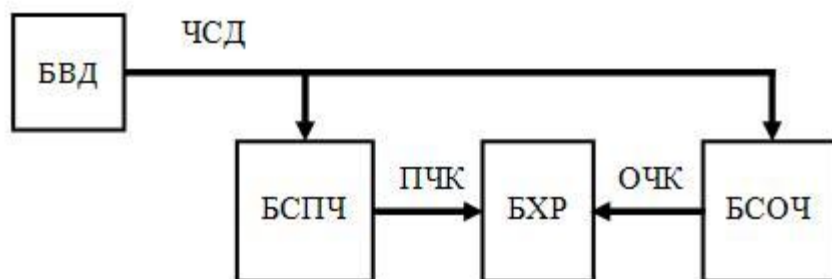


Рис. 11. Специализированный вычислительный модуль СпецВычМод5: БВД – блок ввода данных; БСПЧ – блок сортировки положительных чисел; БСОЧ – блок сортировки отрицательных чисел; БХР – блок хранения результата

Выводы

Архитектура реконфигурируемых вычислительных систем может динамически изменяться в процессе их функционирования. Появляется возможность адаптации архитектуры вычислительной системы под структуру решаемой задачи, создавать проблемно-ориентированные вычислители, структура которых соответствует структуре решаемой задачи. В качестве основного вычислительного элемента в реконфигурируемых вычислительных системах используются не универсальные микропроцессоры, а программируемые логические интегральные схемы, которые объединены с помощью высокоскоростных интерфейсов в единое вычислительное поле. Реконфигурируемые мультимиконвейерные вычислительные системы на основе полей являются эффективным средством для решения потоковых задач обработки информации и

управления. Они могут создавать в базовой архитектуре поля программируемых логических интегральных схем, виртуальные специализированные мультимиконвейерные вычислительные модули, адекватные графу решаемой задачи. Это обеспечивает высокую эффективность мультимиконвейерных вычислений, дает превосходство по технико-экономическим характеристикам над МВС с традиционной архитектурой. Семейство реконфигурируемых вычислительных систем с динамически перестраиваемой архитектурой на основе программируемых логических интегральных схем предназначено для решения вычислительно трудоемких задач, в том числе и большого размера, решение которых на многопроцессорных вычислительных системах традиционной архитектуры либо требует недопустимо больших временных затрат, либо вообще невозможно [11].

Список литературы

1. Хорошевский В.Г. Архитектура вычислительных систем. М., 2008. 520 с.
2. Гузик В.Ф., Каляев И.А., Левин И.И. Реконфигурируемые вычислительные системы. Таганрог.: Южный федеральный университет, 2016. 472 с.
3. Пат. 2453910 Рос. Федерация Вычислительная открытая развиваемая асинхронная модульная система ВОРАМС / Шевелев С.С.; № 2009113184/08 заявл. 08.04.2009; опубл. 20.06.2012, Бюл. № 17. 81 с.
4. Хокни Р., Джессхоуп К. Параллельные ЭВМ. Архитектура, программирование и алгоритмы. М.: Радио и связь, 1986. 392 с.

5. Шевелев С.С. Вычислительная открытая развиваемая асинхронная модульная система // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 4. С. 86-92.
6. Шевелев С.С. Устройство параллельного поиска и замены вхождений в обрабатываемых словах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №4 (43). С. 32-36.
7. Пат. 2223538 Рос. Федерация Устройство сортировки слов. Шевелев С.С.; № 2002109134/09/ заявл. 08.04.2002; опубл. 10.02.2004, Бюл. № 4.
8. Шевелев С.С., Лопин В.Н. Система взаимораспределения ресурсов // Известия Курского государственного технического университета. 2008. №1 (22). С. 74– 78.
9. Пат. 2453900 Рос. Федерация. Параллельный сумматор-вычитатель в троичной системе счисления на нейронах. Шевелев С.С. № 2010108106/08/; заявл. 04.03.2010; опубл. 20.06.2012, Бюл. № 17.
10. Пат. 2382396 Рос. Федерация. Устройство сортировки информации методом преобразования данных в адрес. Шевелев С.С., Кобелев В.Н., Шевелева Е. С., Солодовников Ф.М. № 2008112463/09/; заявл. 31.03.2008; опубл. 20.02.2010, Бюл. № 5.
11. Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2008. 320 с.

Поступила в редакцию 11.03.2019

Подписана в печать 27.03.2019

Reference

1. Khoroshevsky V.G. Architecture of computing systems. Moscow, 2008, 520 p. (In Russ.).
2. Guzik V.F., Kalyaev I.A., Levin I.I. Reconfigurable computing systems. Taganrog, 2016, 472 p. (In Russ.).
3. Pat. 2453910 Ros. Federation. Computational open developed asynchronous modular system VORAMS / S.Shevelev; No. 2009113184/08 declare 04/08/2009; publ. 20.06.2012, Byul. no. 17. 81 p.
4. Hockney R., Jesshope K. Parallel computers. Architecture, programming and algorithms. Moscow, Radio and communication Publ., 1986, 392 p. (In Russ.).
5. Shevelev S.S. Vychislitel'naya otkrytaya razvivaemaya asinkhronnaya modul'naya sistema [Computational open developed asynchronous modular system]. *Problemy informatsionnoi bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* = *Problems of information security. Computer systems of the St. Petersburg State Polytechnic University*, 2013, no. 4, pp. 86-92 (In Russ.).

6. Shevelev S.S. Ustroistvo parallel'nogo poiska i zameny vkhozhdenni v obrabatyvaemykh slovakh [The device parallel search and replace occurrences in the processed words]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no.4 (43), pp. 32-36 (In Russ.).
7. Pat. 2223538 Ros. Federation Word sorting device. S.Shevelev; No. 2002109134/09 / declare 04/08/2002; publ. 10.02.2004, Byul. no. 4.
8. Shevelev S.S., Lopin V.N. Sistema vzaimoraspredeleniya resursov [System of mutual allocation of resources]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2008, no.1 (22), pp. 74– 78 (In Russ.).
9. Pat. 2453900 Ros. Federation. Parallel adder-subtractor in the ternary number system on neurons / S.Shevelev; No. 2010108106/08 declare 03/04/2010; publ. 20.06.2012, Byul. no. 17.
10. Pat. 2382396 Ros. Federation. Shevelev S.S., Kobelev V.N., Sheveleva E.S., Solodovnikov F.M. A device for sorting information by converting data to an address. No. 2008112463/09; declare March 31, 2008; publ. 20.02.2010, Bull. No. 5
11. Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A. Reconfigurable multi-pipeline computing structures. Rostov-on-Don, 2008, 320 p. (In Russ.).

Received 11.03.2019

Accepted 27.03.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Сергей Степанович Шевелев, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: schewelew@mail.ru

Sergey S. Shevelev, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: schewelew@mail.ru

УДК 004.832.32

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-153-173

Исследование и организация приоритетных режимов в сетевой распределенной вычислительной системе с архитектурой в виде облачного сервиса

Мустафа Садек Джафар ✉

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», Россия, 440026, Пенза, ул. Красная, 40

✉ e-mail: mustafajaafar221087@gmail.com

Резюме

Актуальность и цель. Объектом исследования является сетевой облачный сервис, построенный на основе реплицированной базы данных. Данные в распределенных вычислительных системах реплицируются в целях обеспечения надежности их хранения, для облегчения доступа к ним, а также для повышения производительности системы хранения данных. В этой связи актуальной и недостаточно полно исследованной является проблема анализа эффективности обработки запросов к реплицированным базам данных в сетевой облачной среде, и, в частности, проблема организации приоритетных очередей запросов на обновление копий баз данных (*update requests*) и запросов на поиск и чтение информации в базах данных (*query requests*). Целью настоящей работы является исследование и организация приоритетных режимов в сетевой распределенной вычислительной системе с архитектурой в виде облачного сервиса.

Материалы и методы. Исследование проведено на основе поведенческих моделей двух видов: модели на основе сетей Петри для описания и проверки правильности функционирования распределенной вычислительной системы с реплицированными базами данных, представленными в виде пула единиц ресурса с несколькими единицами, и модели на основе языка имитационного моделирования GPSS для приближенной оценки времени пребывания запросов каждого типа в очередях в зависимости от приоритета запросов.

Результаты. На основе двух методов имитационного моделирования проведен анализ функционирования облачной системы с репликами баз данных, в которой взаимодействуют две распределенные облачные вычислительные системы: MANET Cloud на основе беспроводной сети и Internet Cloud на основе сети Интернет. В совокупности базы данных являются основой облачного сервиса DBaaS – Data Bases as a Service on Demand (базы данных как сервис, организуемый по требованию пользователя). Для исследования данной системы построены модели двух классов. Модель на основе сети Петри предназначена для проверки моделируемого распределенного приложения на правильность функционирования. Обсуждаются решения по отображению сетей Петри на архитектуру компьютерных сетей. Имитационная статистическая модель используется для сравнения приоритетного и беспriorитетного режимов обслуживания *query*- и *update*-запросов по критерию среднего времени пребывания запросов в очередях.

Выводы. Модели системы на основе сетей Петри прошли проверку, которая показала их живость и безопасность, что позволяет от моделей переходить к построению формализованных спецификаций для сетевых приложений для сетевых облачных сервисов в распределенных вычислительных системах с реплицированными базами данных. Исследование GPSS-модели показало, что в случае приоритетного обслуживания *update*-запросов время ожидания для них сокращается примерно в 2 – 4 раза по сравнению с *query*-запросами в зависимости от интенсивности поступления *query*-запросов. При беспriorитетном режиме условия обслуживания *update*-запросов ухудшаются и время ожидания в очереди для них увеличивается примерно в 2 – 6 раз по сравнению с *query*-запросами в зависимости от интенсивности поступления *query*-запросов.

Ключевые слова: распределенные вычислительные системы; реплицированные базы данных; облачные сервисы; приоритетное обслуживание запросов; модели на основе сетей Петри; GPSS-модель.

© Мустафа Садек Джафар, 2019

Благодарности: Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю Сергею Александровичу Зинкину, доктору технических наук, профессору кафедры «Вычислительная техника» Пензенского государственного университета за полезные обсуждения и консультации при подготовке данной работы.

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

Для цитирования: Мустафа Садек Джафар. Исследование и организация приоритетных режимов в сетевой распределенной вычислительной системе с архитектурой в виде облачного сервиса // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 153-173. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-153-173.

UDC 004.832.32

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-153-173

Research and Organization of Priority Modes in a Network Distributed Computing System with Cloud Service Architecture

Mustafa Sadeq Jaafar ✉

Penza State University, 40, Krasnaya str., Penza, 440026, Russian Federation

✉ e-mail: mustafajaafar221087@gmail.com

Abstract

Purpose of research. The object of the study is a network cloud service built on the basis of a replicated database. Data in distributed computing systems are replicated in order to ensure the reliability of their storage, facilitate access to data as well as to improve the storage system performance. In this regard, the problem of analyzing the effectiveness of processing the queries to replicated databases in a network-based cloud environment, and, in particular, the problem of organizing priority query queues for updating database copies (update requests) and for searching and reading information in databases (query-requests). The purpose of this work is to study and organize priority modes in a network distributed computing system with cloud service architecture.

Methods. The study was conducted on the basis of two types of behavioural patterns: models based on Petri nets to describe and verify the functioning of a distributed computing system with replicated databases represented as a pool of resource units with several units, and models based on the GPSS simulation language for possible evaluation of passage of query time of each type in queues depending on the priority of queries.

Results. Based on two simulation methods, the operation of a cloud system with database replicas was analyzed. In this system two distributed cloud computing systems interact: MANET Cloud based on a wireless network and Internet Cloud based on the Internet. These databases together are the basis of the DBaaS (Data Bases as a Service) cloud service (databases as a service organized at user's query). To study this system the models of two classes were developed. The model based on Petri nets is designed to test the simulated distributed application for proper functioning. The decisions on the mapping of Petri nets on the architecture of computer networks are discussed. The simulation statistical model is used to compare the priority and non-priority maintenance modes of query- and update-requests by the criterion of average passage of time of queries in queues.

Conclusion. System models based on Petri nets were tested, which showed their liveness and security, which makes it possible to move from models to building formalized specifications for network applications for network cloud services in distributed computing systems with replicated databases. The study of GPSS-model showed that in the case of priority service of update-requests, the time of passage for them is reduced by about 2 to 4 times compared with query-requests, depending on the intensity of the query-requests. In the non-priority mode, the serving conditions for update-queries deteriorate and the time of passage in the queue for them increases by about 2 to 6 times as compared with query-requests depending on the intensity of the query-requests.

Keywords: *distributed computing systems; replicated database; Cloud Service; priority queries service; models based on Petri nets; GPSS-model.*

Acknowledgements: *The author expresses deep gratitude to his scientific supervisor Sergey Alexandrovich Zinkin, doctor of technical Sciences, Professor of the Department of "Computer engineering" of Penza state University for useful discussions and consultations in the preparation of this work.*

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

For citation: Mustafa Sadeq Jaafar Research and Organization of Priority Modes in a Network Distributed Computing System with Cloud Service Architecture. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(2): 153-173 (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-153-173.

Введение

Технологии создания сетевого промежуточного программного обеспечения класса *middleware* во многом пересекаются с другими известными в современной международной практике технологиями, такими как Cloud Computing [1 – 4] (облачные вычисления), Grid Computing [5 – 8] (грид-вычисления), Utility Computing [9 – 12] (вычисления как услуги), Services Computing [13 – 15] (сервис-ориентированные вычисления), Peer-to-Peer Computing [16, 17] (пиринговые системы) и Distributed Computing [18 – 21] (распределенные вычисления) в целом. Классификация, учитывающая современные тенденции развития распределенных систем и вычислений, дана в работе [22].

Во многих распределенных вычислительных системах используются крупномасштабные базы данных. Одной из важнейших проблем в подобных системах является проблема распределения данных и, в частности, проблема хранения копий данных (так называемых “реплик”). Данные в распределенных вычислительных системах реплициру-

ются в целях обеспечения надежности их хранения, для облегчения доступа к ним, а также для повышения производительности системы хранения данных. Существует несколько способов создания и согласованного использования реплик баз данных: синхронные и асинхронные, статические и динамические, репликация на уровне транзакций в сетях и другие [23 – 29]. В этой связи актуальной и недостаточно полно исследованной является проблема анализа эффективности обработки запросов к реплицированным базам данных в сетевой облачной среде, и, в частности, проблема организации приоритетных очередей запросов на обновление копий баз данных (Update requests) и запросов на поиск и чтение информации в базах данных (Query requests).

Целью настоящей работы является исследование и организация приоритетных режимов в сетевой распределенной вычислительной системе с архитектурой в виде облачного сервиса. Исследование проведено при помощи поведенческих моделей двух видов: модели на основе сетей Петри для описа-

ния и проверки правильности функционирования распределенной вычислительной системы с реплицированными базами данных, представленными в виде пула единиц ресурса с несколькими единицами и модели для приближенной оценки времени пребывания запросов каждого типа в очередях в зависимости от приоритета запросов.

Материалы и методы решения задачи

В работе [22] приведена общая схема подключения клиентской облачной сети MANET Cloud к ресурсам исполнительной облачной среды Internet Cloud, которую иллюстрирует рисунок 1. Сети MANET [30 – 34] (Mobile Ad

hoc NETworks) представляют собой беспроводные самоорганизующиеся сети со случайными мобильными абонентами, реализующие полностью децентрализованное управление при отсутствии базовых станций или опорных узлов. На рисунке 1 представлена распределенная вычислительная система, в которой взаимодействуют две типовые распределенные облачные вычислительные системы: MANET Cloud и Internet Cloud.

Принято, что клиент-серверная архитектура доступа клиентов к серверам реализуется через составную TCP/IP сеть [35].

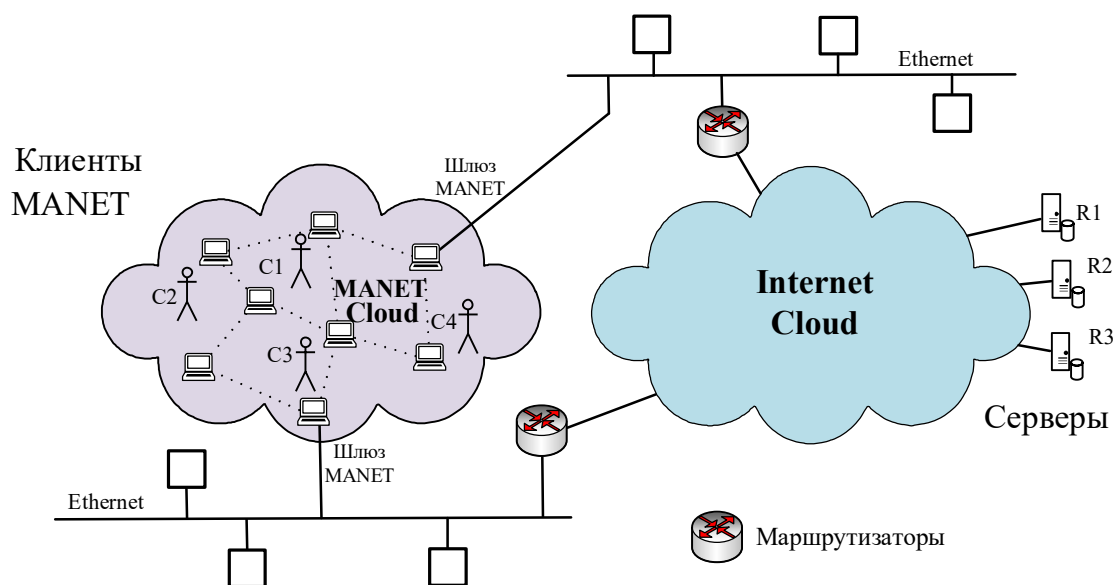


Рис. 1. Взаимодействие двух распределенных облачных вычислительных систем через локальные сети типа Ethernet

Здесь символами $C_1, C_2, \dots, C_n$ обозначены клиентские приложения сети MANET Cloud, а символами $R_1, R_2, \dots, R_m$ – ресурсы (копии баз данных), размещенные на серверах сети Internet

Cloud. Шлюзы и локальные сети типа Ethernet обеспечивают связь между двумя облачными подсистемами.

Пример развертывания ресурсов, например, серверов баз данных, в об-

лачной среде Internet Cloud, реализованной на основе TCP/IP сети, представлен на рисунке 2. На нем представлены реплики баз данных (Databases),

пользовательские станции (Users), серверы (Servers), коммутаторы (Switches) и маршрутизаторы (Routers).

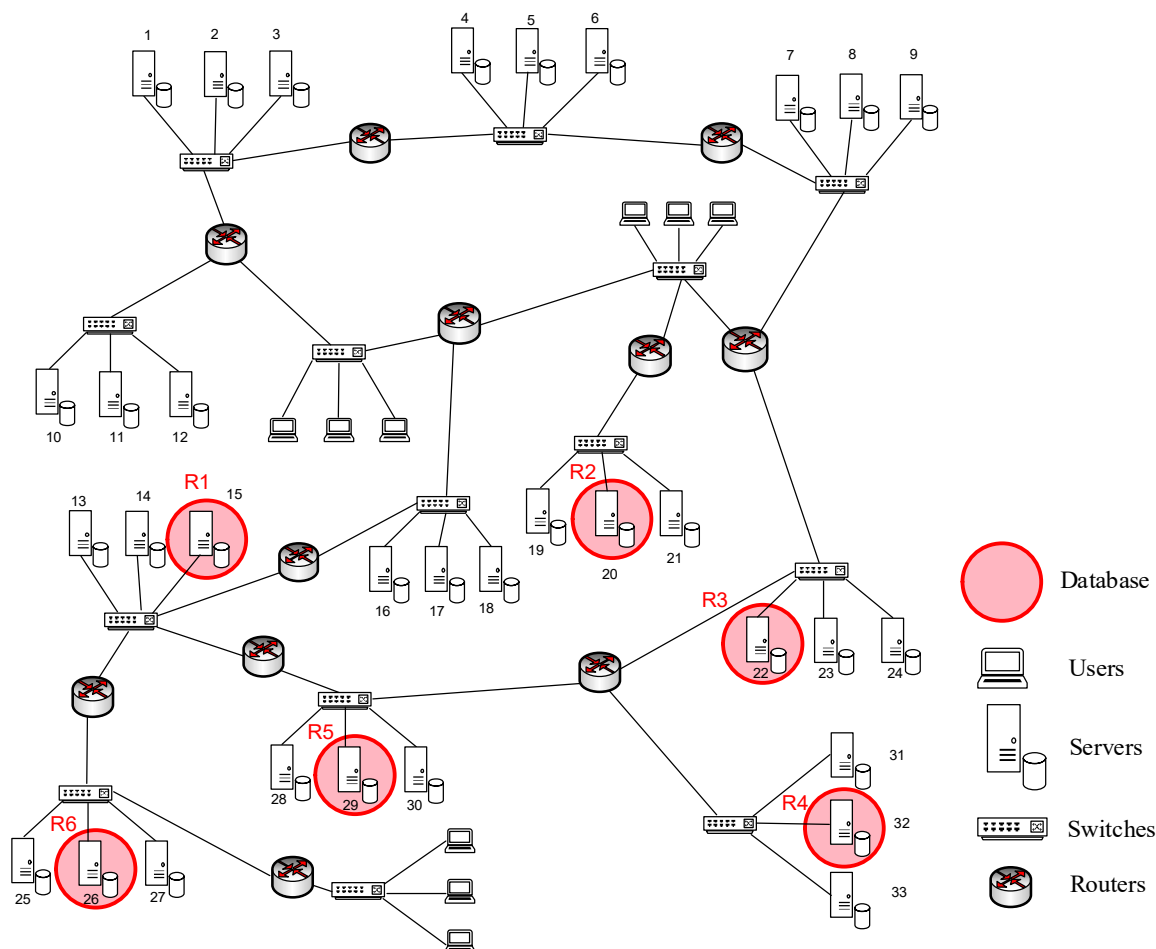


Рис. 2. Пример развертывания мультисерверной системы баз данных в TCP/IP сети

Анализируется пример организации доступа к распределенной мультисерверной системе баз данных с репликацией. Упрощенная схема в виде системы массового обслуживания, моделирующей доступ к базам данных в сети, представлена на рисунке 3. Копии баз данных при этом размещаются на разных узлах, а запросы делятся на два типа – запросы на поиск и чтение данных (Query requests), образующие очередь Q_{One} запросов к одной из баз данных и

запросы на модификацию данных (Update requests), образующие очередь Q_{All} на обращение ко всем базам данных. Запросы формируются в пользовательской сети MANET Cloud (User network) при помощи программных агентов (Agents). Ответы (Query responses и Update responses) на запросы обоих типов возвращаются пользователям.

В совокупности базы данных являются основой облачного сервиса DBaaS (Data Bases as a Service on Demand (базы

данных как сервис, организуемый по требованию пользователя). Система типа DBaaSOD представляет собой один из вариантов реализации концепции построения сетевой облачной системы типа NCaaSOD – Network Computing as a Service On Demand (компьютерная сетевая архитектура как облачный сервис по запросу пользователя). Реализация концепции “Service on Demand” в общем виде предложена в работе [36]. Для исследования данной системы целесообразно построить модели двух классов. Модель на основе сети Петри предназначена для проверки моделируемого распределенного приложения на правильность функционирования, а также, возможно, для получения на ее

основе формализованных исполнимых логико-алгебраических спецификаций. Вопросы отображения сетей Петри на архитектуру компьютерных сетей, в том числе программные реализации таких отображений на языке Java, описаны, например, в работах [37, 38].

Имитационная статистическая модель, построенная, например, при помощи известной системы GPSS World [39], может быть использована для оценки некоторых характеристик моделируемой системы, например, для сравнения приоритетного и беспriorитетного режимов функционирования по критерию среднего времени пребывания запросов в очередях Q_{All} и Q_{One} .

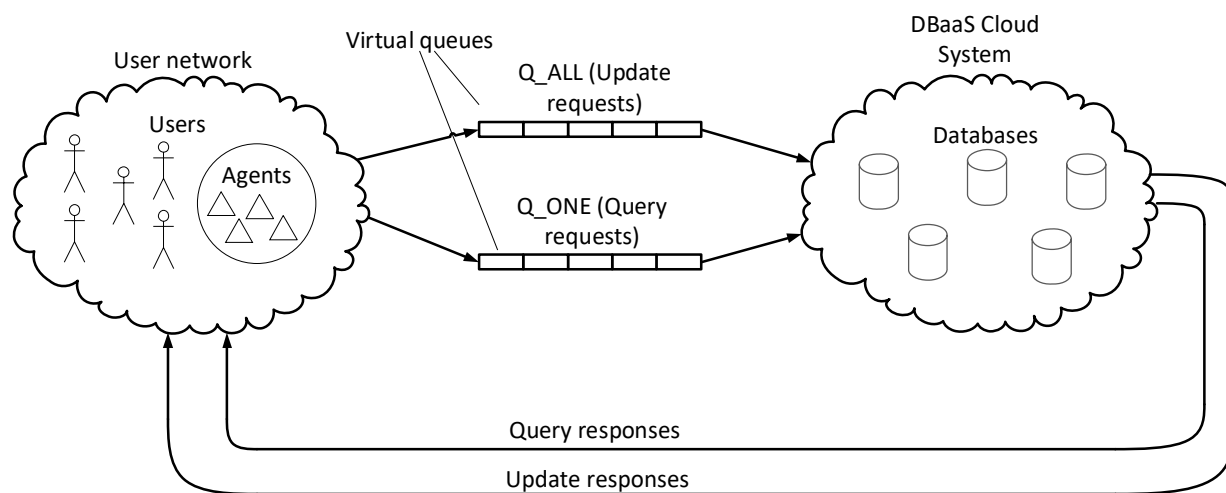


Рис. 3. Облачная система с сервисом DBaaSOD (DataBases as a Service on Demand)

Модель организации обслуживания очередей Q_{All} и Q_{One} для доступа к ресурсу R с несколькими единицами при беспriorитетном режиме обслуживания дана на рисунке 4. Здесь позициями a_1 и b_1 представлены места для ожида-

ний запросов в очереди Q_{All} , а позициями c_1 , d_1 и e_1 – места для ожидания в очереди Q_{One} . Каждый запрос представлен процессом (меткой), обращающимся к пулу единиц r_1 , r_2 и r_3 ресурса R , причем каждому из update-запросов в

позициях a_1 и b_1 требуются все три единицы ресурса R , а запросам в позициях c_1 , d_1 и e_1 требуется по одной единице ресурса R . Здесь метки в позициях r_1 , r_2 и r_3 представляют собой реплики базы данных. Некоторые дуги в данной сети Петри являются ингибиторными (сдерживающими). Они оканчиваются не стрелками, а кружками и разрешают срабатывание переходов при отсутствии меток в исходных позициях. Логика срабатывания переходов здесь

проста: переход срабатывает в том случае, если в его входных позициях, связанных с данным переходом простыми дугами, есть по одной метке, а во входных позициях, связанных ингибиторными дугами, метки отсутствуют.

Сетевая модель организации очередей Q_{All} и Q_{One} для доступа к ресурсу R с несколькими единицами при приоритетном режиме обслуживания приведена на рисунке 5.

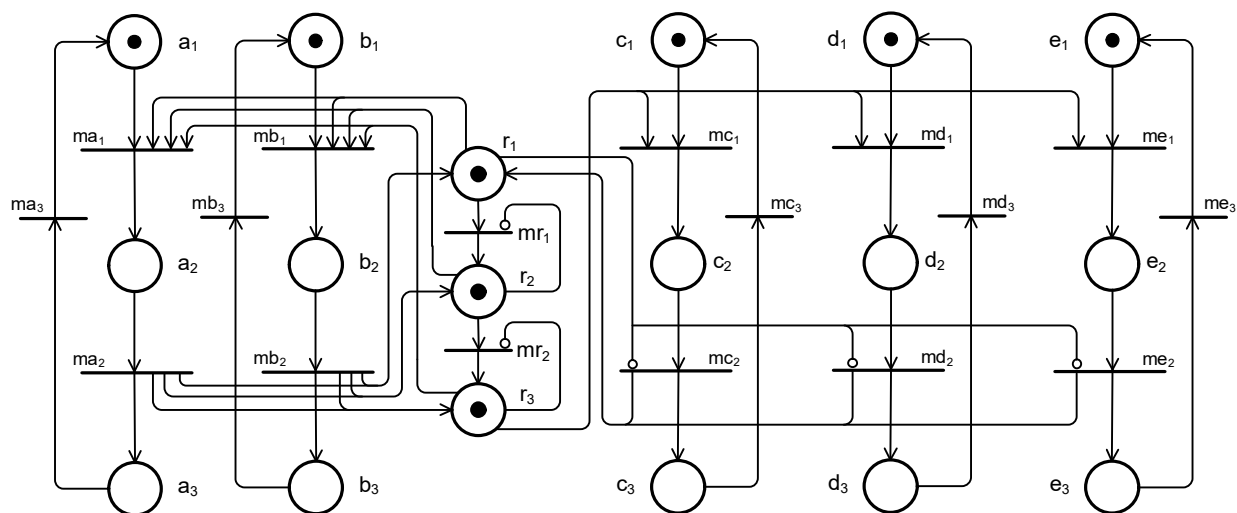


Рис. 4. Модель организации очередей Q_{All} и Q_{One} для доступа к ресурсу с несколькими единицами (бесприоритетный режим)

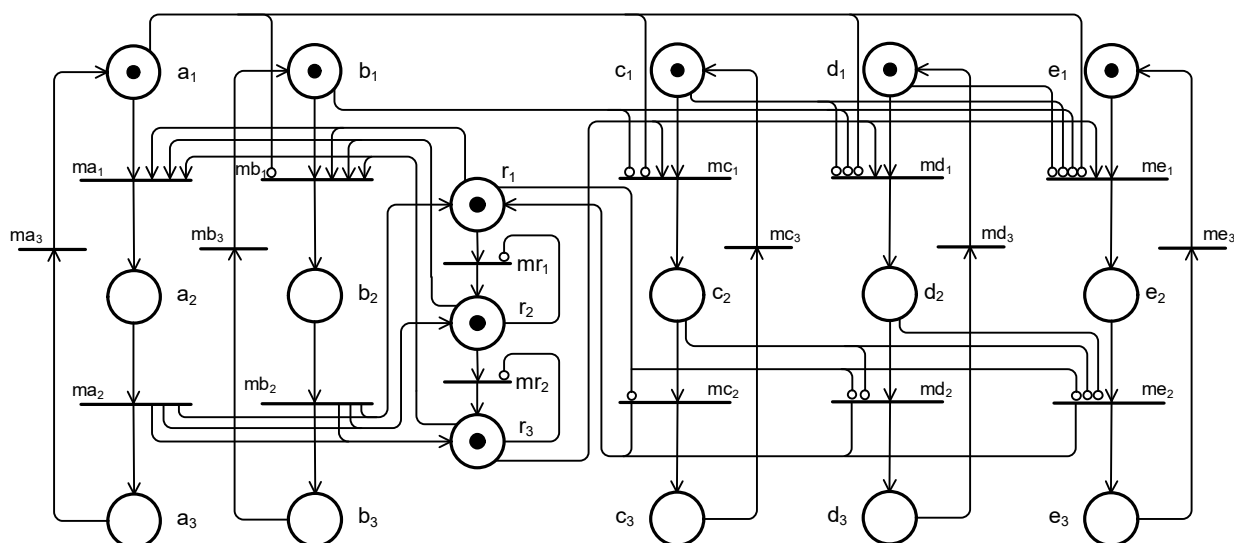


Рис. 5. Модель организации очередей Q_{All} и Q_{One} для доступа к ресурсу с несколькими единицами (приоритетный режим обслуживания запросов очереди Q_{All} по сравнению с запросами из очереди Q_{One})

Данная модель отличается от предыдущей модели наличием дополнительных ингибиторных дуг, запрещающих срабатывание переходов mc_1 , md_1 и me_1 для запросов с низшими приоритетами при наличии запросов с высшими приоритетами, то есть при наличии меток в позициях a_1 или b_1 .

Обе модели, представленные на рисунках 4 и 5, прошли проверку при помощи известной в международной практике системы PIPE [40] (Platform Independent Petri net Editor – независимый от платформы редактор и интерпретатор сетей Петри). Эта система обладает широкими возможностями по исследованию сетей Петри распространенных классов, включая анализ графа достижимых состояний и статистическое имитационное моделирование. Проверка показала живость и безопасность предложенных сетей Петри, что позволяет от моделей переходить к построению формализованных спецификаций для сетевых приложений.

Результаты и их обсуждение

GPSS-модель, представленная на рисунке 6, состоит из двух частей – операторы 1 – 14 моделируют прохождение потока запросов типа “update”, а операторы 15 – 28 – запросов типа “query”. В процессе моделирования производится сбор статистических данных об

очередях Q_ALL для запросов типа “update” и Q_ONE для запросов типа “query”.

Основной ресурс – совокупность баз данных, имитируется в модели при помощи многоканального устройства RESURS (объекта типа “память” в терминах системы моделирования GPSS [39]). Каждая реплика базы данных представлена отдельной единицей (“каналом”) этого устройства.

Оператор 1 генерирует поток *update*-запросов. Оператор 2 имитирует задержку. Оператор 3 собирает статистические данные об очереди Q_ALL *update*-запросов. Оператор 4 позволяет *update*-запросу занять одноканальное устройство FOC_ALL, имитирующее в модели компьютер провайдера облачного сервиса. Оператор 5 при необходимости может понизить приоритет *update*-запроса по сравнению с *query*-запросом путем блокировки дальнейшего продвижения *update*-запросов при наличии *query*-запросов в очереди Q_ONE . Установкой символа звездочки перед оператором это ограничение снимается. Оператор 7 проверяет незанятость всех единиц ресурса RESURS. Оператор 8 позволяет *update*-запросу занять сразу все единицы этого ресурса. Тем самым в модели имитируется занятие всех реплик баз данных для выполнения одинаковых модификаций.

```

*Модель системы с сервисом DBaaSOD
* Запросы типа ALL
1      GENERATE (EXPONENTIAL(1,0,200))
2      ADVANCE
3      QUEUE Q_ALL
4      SEIZE      FOC_ALL
5*      TEST E Q$Q_ONE,0
6      ADVANCE 10
7      GATE SE RESURS
8      ENTER RESURS,8
9      RELEASE  FOC_ALL
10     DEPART Q_ALL
11     ADVANCE 100,50
12     LEAVE RESURS,8
13     TABULATE TAB_ALL
14     TERMINATE 1
* Запросы типа ONE
15     GENERATE (EXPONENTIAL(1,0,125))
16     ADVANCE
17     QUEUE Q_ONE
18     SEIZE      FOC_ONE
19     TEST E Q$Q_ALL,0
20     ADVANCE 10
21     GATE SNF RESURS
22     ENTER RESURS,1
23     RELEASE  FOC_ONE
24     DEPART Q_ONE
25     ADVANCE 100,50
26     LEAVE RESURS,1
27     TABULATE TAB_ONE
28     TERMINATE 1
*
29 RESURS STORAGE 8
30 TAB_ALL  TABLE  M1,0,100,30
31 TAB_ONE  TABLE  M1,0,100,30
32          START   100000

```

Рис. 6. Имитационная GPSS-модель системы типа DBaaSOD

Оператор 9 освобождает устройство FOC_ALL. Оператор 10 собирает статистические данные об очереди Q_ALL при выходе из нее *update*-запроса. Оператор 11 задерживает запрос на время имитации выполнения операции модификации данных. Оператор 12 освобождает все единицы ресурса RESURS. Оператор 13 формирует данные для гистограммы времени обслуживания запроса. Оператор 14 аннулирует запрос.

Вторая часть модели построена таким же образом для *query*-запросов, только здесь каждому запросу для имитации его выполнения требуется лишь одна единица ресурса RESURS.

Приоритет для *update*-запросов задается следующим образом:

```

5*      TEST E Q$Q_ONE,0
. . .
19      TEST E Q$Q_ALL,0

```

а беспriorитетному режиму соответствуют следующие строки в модели:

```

5*      TEST E Q$Q_ONE,0
. . .
19*     TEST E Q$Q_ALL,0

```

то есть приоритет в модели задается простым исключением условия блокировки запроса (звездочка в первой позиции строки превращает строку оператора в строку комментария; номер строки не является частью оператора).

В строке 29 задано число единиц ресурса RESURS – число реплик баз данных в моделируемой системе (то есть число единиц в многоканальном устройстве RESURS). В строках 30 и 31 заданы параметры для гистограмм времени обслуживания запросов соответствующих типов. Строкой 32 задается число пропускаемых через систему запросов при прогоне модели.

Исследование модели проведено для двух режимов управления потоков запросов – при высшем приоритете у *update*-запросов в очереди Q_ALL и при беспriorитетном режиме. Входная нагрузка на систему для *update*-запросов определяется в операторе 1 GENERATE (EXPONENTIAL(1,0,200)), где задается экспоненциальное распределение интервалов между *update*-запросами. Среднее значение интервала задано третьим операндом функции EXPONENTIAL. В данном случае это значение равно $T_U = 200$ мс (интенсивность потока *update*-запросов λ_U при этом равна 5 запросам в секунду).

Входная нагрузка на систему для *query*-запросов аналогично определяется в операторе 15 GENERATE

(EXPONENTIAL(1,0,125)), где задается экспоненциальное распределение интервалов между *query*-запросами. Среднее значение интервала задано третьим операндом функции EXPONENTIAL. В данном случае это значение равно $T_Q = 125$ мс (интенсивность потока *query*-запросов λ_Q при этом равна 8 запросам в секунду).

На рисунках 7 и 8 представлены некоторые результаты статистических экспериментов с GPSS-моделью системы типа DBaaSOD как для приоритетного обслуживания *update*-запросов по сравнению с обслуживанием *query*-запросов (рис. 7), так и для случая равных приоритетов, что эквивалентно в данном случае для беспriorитетного режима обслуживания запросов (рис. 8) при числе реплик баз данных $Res = 8$. Везде полагалось, что интенсивность потока *update*-запросов $\lambda_U = 5$ 1/с, то есть 5 запросам в секунду. В случае приоритетного обслуживания *update*-запросов время ожидания для них сокращается примерно в 2 – 4 раза по сравнению с *query*-запросами в зависимости от интенсивности поступления λ_Q *query*-запросов. При беспriorитетном режиме условия обслуживания *update*-запросов ухудшаются и время ожидания в очереди для них увеличивается примерно в 2 – 6 раз по сравнению с *query*-запросами в зависимости от интенсивности поступления λ_Q *query*-запросов.

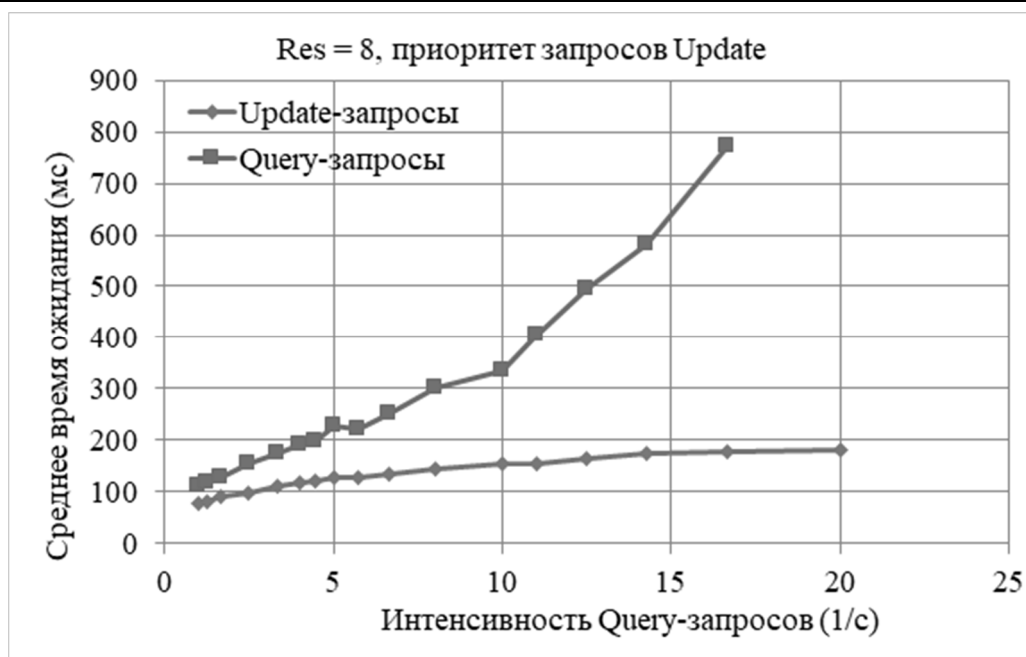


Рис. 7. Зависимости среднего времени ожидания запросов при приоритетном режиме; Res = 8

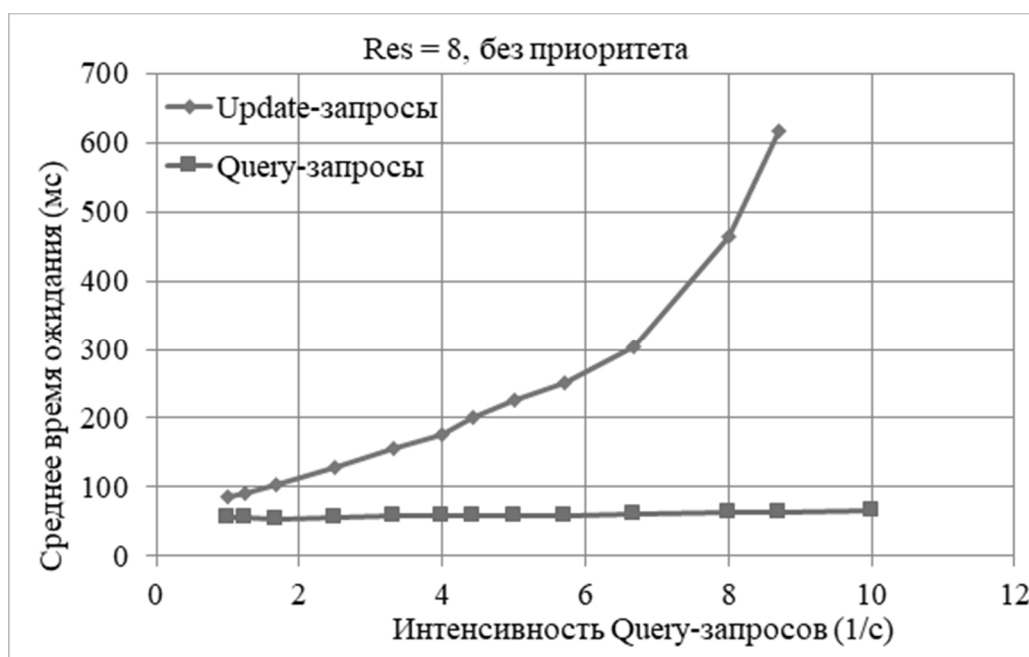


Рис. 8. Зависимости среднего времени ожидания запросов при бесприоритетном режиме; Res = 8

Моделирование системы при другом числе реплик *Res* дало похожие результаты. Таким образом, в результате проведенных статистических экспериментов установлено, что высший приоритет рекомендуется устанавливать для *update*-запросов, так как от них зависит

актуальность хранимой в базах данных информации и поэтому сокращение времени обслуживания для них целесообразно.

Построенная выше GPSS-модель позволяет получить оценку времени ожидания в очередях и дает лишь при-

близительное представление об организации функционирования системы. Реализацию распределенных приложений в системе типа DBaaSD возможно осуществить путем непосредственного вложения сети Петри в архитектуру компьютерной TCP/IP сети. Метод отображения сети Петри в архитектуру беспроводной мобильной вычислительной сети MANET, управляющей роботизированным производством, предложен в работах [41, 42]. Метод базируется на использовании логико-алгебраических спецификаций. Однако возможно и непосредственное отображение сети Петри в архитектуру компьютерной сети. Пример вложения фрагмента сети Петри в распределенную вычислительную систему на базе TCP/IP сети представлен на рисунке 9. Здесь представлены виртуальные узлы-позиции (Nodes-positions), узлы-переходы (Nodes-transitions) и метки, или маркеры (Markers). Описана ситуация, когда входные позиции p_1, p_2, p_3 , переход t_1 и выходная позиция p_4 и размещены на соответствующих логических узлах $n_{p1}, n_{p2}, n_{p3}, n_{t1}$ и n_{p4} компьютерной TCP/IP сети. Определены следующие унарные функции f_{Node} и $f_{Address}$:

$$f_{Node}: P \cup T \rightarrow Node;$$

$$f_{Address}: Node \rightarrow IPaddress,$$

где $Node$ – множество логических узлов компьютерной сети; $IPaddress$ – множество физических узлов в TCP/IP сети с уникальными IP-адресами; P и T – множества позиций и переходов сети LogNet, реализуемых в TCP/IP сети.

Например, выражение $f_{Address}(f_{Node}(p_1))$ позволяет определить IP-адрес 129.44.192.1 узла $n_{p1} = f_{Node}(p_1)$, на котором реализована позиция p_1 . Дуги, изображенные на рисунке 9 – виртуальные, реально же при реализации сетей Петри в TCP/IP сети используется ее физическая инфраструктура – маршрутизаторы, каналы связи и другие объекты. Метки по физической сети передаются в виде сообщений.

При программной реализации распределенного приложения предлагаются следующие варианты активации перехода в TCP/IP сети.

Программа перехода t_1 , размещенная на узле n_{t1} , посылает запросы к узлам n_{p1}, n_{p2} и n_{p3} , на которых размещены программы, реализующие позиции p_1, p_2 и p_3 соответственно.

В ответ удаленные программы посылают сообщения-маркеры (если они имеются в наличии; в противном случае происходит ожидание их появления) на узел n_{t1} , и после приема этих сообщений программа перехода t_1 отправляет сообщение-маркер со своего узла n_{t1} на узел n_{p4} , где оно принимается программой позиции p_4 .

Второй вариант имеет следующие отличия в реализации: после приема опрашивающих сообщений, поступающих от перехода к его входным позициям, найденные маркеры блокируются. Узел-переход n_{t1} сработает только в том случае, когда поступит подтверждение о том, что во всех его входных позициях имеются маркеры.

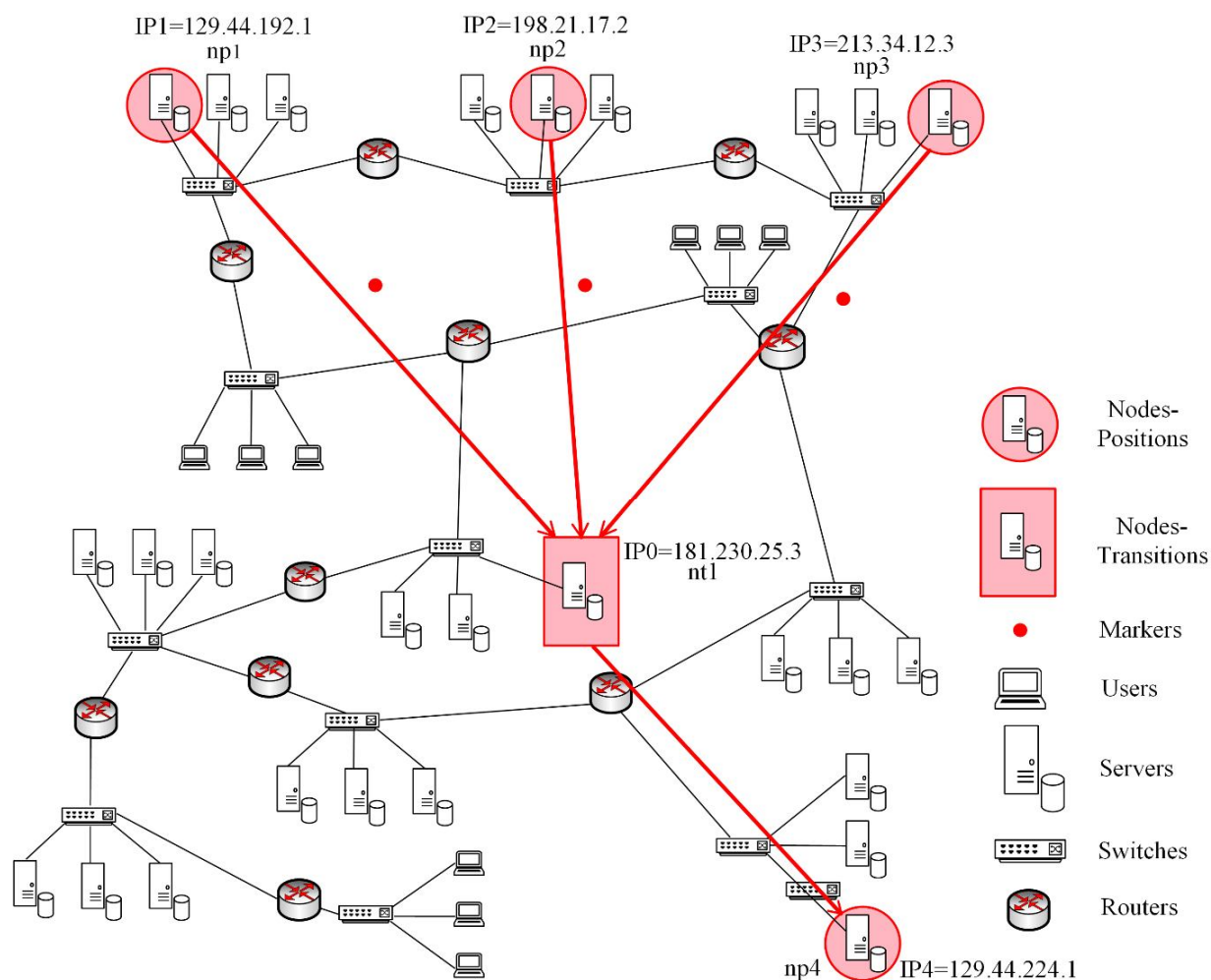


Рис. 9. Пример вложения фрагмента сети Петри в распределенную вычислительную систему на базе TCP/IP сети

В третьем случае все сообщения-маркеры передаются немедленно на узел-переход после их появления на входных узлах-позициях. Получив все необходимые сообщения, узел-переход n_{i1} срабатывает и отправляет выходное сообщение на узел-позицию n_{p4} .

В случае использования в сети Петри ингибиторных и информационных дуг на узел-переход поступают не сообщения-маркеры, а маркеры-уведомления о текущем состоянии входных узлов-позиций, поступающие после предварительного опроса со стороны

узла-перехода. Например, после опроса узла-позиции, связанного с узлом-переходом ингибиторной дугой, поступает маркер-уведомление о том, что в узле-позиции нет ни одного маркера, а после опроса узла-позиции, связанного с узлом-переходом информационной дугой, поступает маркер-уведомление о том, что в узле-позиции есть по крайней мере один маркер.

Возможны и другие варианты реализации процедур переходов в компьютерной сети. В общем случае правило срабатывания перехода имеет следую-

щий вид (в форме модуля-процедуры mt_i некоторого перехода t_i):

$$mt_i: A; [\alpha](B \vee Ret_{\tau, n}); C,$$

где операторам A и C соответствуют действия, выполняемые до и после срабатывания перехода t_i в сети; α – условие активизации перехода, определяемое состоянием его входных позиций; B – процедура перехода t_i , выполняемая при истинном условии α и определяющая основные действия (например, поиск и чтение данных, внесение изменений в базу данных), а также операции с содержимым входных и выходных позиций; $Ret_{\tau, n}$ – оператор возврата к проверке условия α , которая может повторяться неоднократно (но не более n раз), символ “;” означает последовательное выполнение, или композицию, операторов.

Алгоритм реализации модуля-процедуры перехода представлен на рисунке 10. Особенностью алгоритма является то, что опрос состояния входных позиций в сети повторяется не более n раз, между последовательными опросами отрабатывается тайм-аут $Delay(\tau)$ на τ единиц реального времени в сети. В случае, когда условие α оказалось ложным после n опросов, выполняется невозможный оператор N , и работа перехода t_i блокируется.

Выводы

На основе двух методов имитационного моделирования проведен анализ функционирования облачной системы с репликами баз данных, в которой взаимо-

действуют две распределенные облачные вычислительные системы: MANET Cloud на основе беспроводной сети и Internet Cloud на основе сети Интернет.

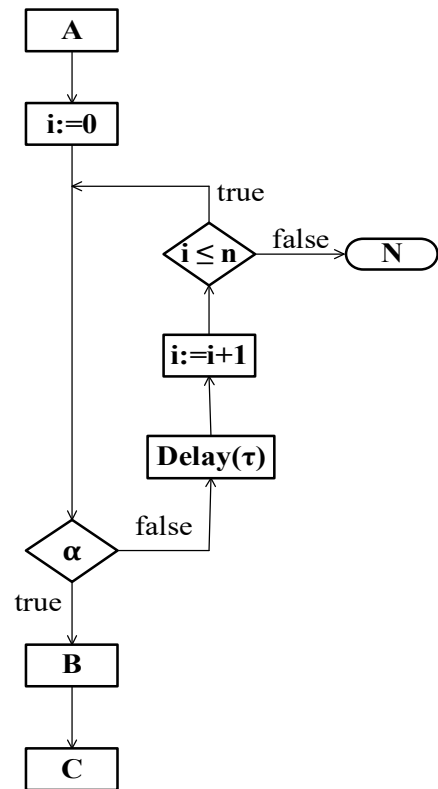


Рис. 10. Алгоритм сетевой реализации модуля-процедуры перехода

В совокупности базы данных являются основой облачного сервиса DBaaS – Data Bases as a Service on Demand (базы данных как сервис, организуемый по требованию пользователя). Для исследования данной системы построены модели двух классов. Модель на основе сети Петри предназначена для проверки моделируемого распределенного приложения на правильность функционирования. Обсуждены решения по отображению сетей Петри на архитектуру компьютерных сетей. Имитационная статистическая модель

использовалась для сравнения приоритетного и беспriorитетного режимов обслуживания query- и update-запросов по критерию среднего времени пребывания запросов в очередях.

Модели системы на основе сетей Петри прошли проверку, которая показала их живость и безопасность, что позволяет от моделей переходить к построению формализованных спецификаций для сетевых приложений для сетевых облачных сервисов в распределенных вычислительных системах с реплицированными базами данных. Ис-

следование GPSS-модели показало, что в случае приоритетного обслуживания update-запросов время ожидания для них сокращается примерно в 2 – 4 раза по сравнению с query-запросами в зависимости от интенсивности поступления query-запросов. При беспriorитетном режиме условия обслуживания update-запросов ухудшаются и время ожидания в очереди для них увеличивается примерно в 2 – 6 раз по сравнению с query-запросами в зависимости от интенсивности поступления query-запросов.

Список литературы

1. Antonopoulos N., Gillam L. (Eds). Cloud Computing. Principles, Systems and Applications. Springer. London, Dordrecht, New York, Heidelberg, 2010. 379 p.
2. Handbook of Cloud Computing / Furht B., Escalante A. (Eds). Springer. New York, Dordrecht, Heidelberg, London, 2010. 634 p.
3. Foster I., Zhao Y., Raicu I, Lu S. Cloud computing and grid computing 360-degree compared // Grid Computing Environments Workshop (GCE'08), 2008, pp. 1-10.
4. Apache CloudStack: Open Source Infrastructure as a Service Cloud Computing Platform / Kumar R., Jain K., Maharwal H., Jain N., Dadhich A. // International Journal of advancement in Engineering technology, Management and Applied Science (IJAETMAS). 2014. Vol. 1, is. 2. P. 111-116.
5. Foster I., Kesselman C., Nick J., Tuecke S. The Physiology of the Grid: An Open Grid Service Architecture for Distributed Systems Integration. 30 p. URL: <https://www.dcc.fc.up.pt/~ines/aulas/1314/CG/papers/physiology.pdf>. Дата доступа: 10.10.2018.
6. Advances in Grid Computing / Edited by Zoran Constantinescu. Published by InTech, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, 2011. 272 p.
7. Демичев А. П., Ильин В. А., Крюков А. П. Введение в грид-технологии: препринт НИИЯФ МГУ 11/832. М., 2007. 87 с.
8. The Grid. Blueprint for a new computing infrastructure / Foster I., Kesselman C. (Eds). San Francisco: Morgan Kaufman, 1999. 677 p.
9. Cluster computing and applications / M. Baker, A. Apon, R. Buyya, H. Jin. In A. Kent & J. Williams (Eds). Encyclopedia of Computer Science and Technology, 2002, pp. 87-125.

10. Sadashiv N., Kumar S. M. D. Cluster, Grid and Cloud Computing: A Detailed Comparison // The 6th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE 2011), August 3-5, 2011. SuperStar Virgo, Singapore, 2011, pp. 477-482.
11. Jaiswal U. C. Study and Applications of Cluster Grid and Cloud Computing // International Journal of Engineering Research and Development. 2012. Vol. 3, No. 1. P. 45-50. e-ISSN: 2278-067X, p-ISSN: 2278-800X.
12. Samah Mawia Ibrahim Omer, Amin Babiker A. Mustafa, Fatema Abdallah Elmahdi Alghali. Comparative study between Cluster, Grid, Utility, Cloud and Autonomic computing // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE). 2014. Vol. 9, is. 6, Ver. III. P. 61-e-ISSN: 2278-1676, p-ISSN: 2320-3331.
13. Kahanwal B., Singh T. P. The Distributed Computing Paradigms: P2P, Grid, Cluster, Cloud, and Jungle // International Journal of Latest Research in Science and Technology. Vol. 1, is. 2, 2012, pp. 183-187. ISSN (Online): 2278-5299.
14. Jungle Computing: Distributed Supercomputing beyond Clusters, Grids, and Clouds / Frank J. Seinstra, Jason Maassen, Rob V. van Nieuwpoort, Niels Drost, Timo van Kessel, Ben van Werkhoven, Jacopo Urbani, Cerial Jacobs, Thilo Kielmann, Henri E. Bal. Department of Computer Science, Vrije Universiteit, De Boelelaan 1081A, 1081 HV Amsterdam, The Netherlands, 2010, pp. 1-31.
15. Kumar R. Comparison between Cloud Computing, Grid Computing, Cluster Computing and Virtualization // International Journal of Modern Computer Science and Applications (IJMCSA). January, 2015. Vol. 3, is. 1. P. 42-47.
16. Chen Rui, Meng Xiao-jing. Modeling of UDP Hole Punching in P2P Network Using Petri Net // International Proceedings of Economics Development and Research. 2012. Vol. 49. P. 150-154.
17. Park H., Ratzin R. I., Schaar M. Peer-to-Peer Networks: Protocols, Cooperation and Competition // Source Title: Streaming Media Architectures, Techniques, and Applications: Recent Advances, 2011. 33 p.
18. Mittal G., Kesswani N., Goswami K. A Survey of Current Trends in Distributed, Grid and Cloud Computing // International Journal of Advanced Studies in Computer Science and Engineering (IJASCSE). 2013. Vol. 2, no. 3. P. 1-6.
19. Tanenbaum A. S., Maarten Van Steen. Distributed Systems: principles and paradigms. 2nd Edition. Pearson Education, Inc., 2007. 669 p.
20. Distributed and Cloud Computing From Parallel Processing to the Internet of Things / Kai Hwang, Geoffrey C. Fox, Jack J. Dongarra. Elsevier, 2012. 648 p.
21. Nicola R., Gorla D., Pugliese R. Global computing in a dynamic network of tuple spaces // Science of Computer Programming. 2007. № 6. P. 187–204.
22. Зинкин С. А., Мустафа Садек Джафар. Развитие информационно-коммуникационных инфраструктур распределенных вычислительных систем на основе кон-

цепции «Сеть – это компьютер» // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22. №4 (79). С. 75-93. DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-4-75-93.

23. Asynchronous Replication Engines // Sombers Associates, Inc., and W. H. Highleyman. November 2006, pp. 1-6.

24. Alireza Sour, Ahmad Habibzad Navin. Consistency of Data Replication Protocols in Database Systems: A Review // International Journal on Information Theory (IJIT). 2014. Vol. 3, no.4. P. 19 – 32.

25. Saadat N., Rahmani A. M. PDDRA: A new pre-fetching based dynamic data replication algorithm in data grids // Future Generation Computer Systems, 2012. Vol. 28. P. 666-681.

26. Wu A.-H., Tan Z.-J., Wang W. // Annotation Based Query Answer over Inconsistent Database // Journal of Computer Science and Technology. 2010. Vol. 25. P. 469-481.

27. Mansouri N., Dastghaibfard G. H., Mansouri E. // Combination of data replication and scheduling algorithm for improving data availability in Data Grids // Journal of Network and Computer Applications. 2013. Vol. 36. P. 711-722.

28. Mansouri N., Dastghaibfard G. H. A dynamic replica management strategy in data grid // Journal of Network and Computer Applications. 2012. Vol. 35. P. 1297-1303.

29. Liao X., Jin H., Yu L. A novel data replication mechanism in P2P VoD system // Future Generation Computer Systems. 2012. Vol. 28. P. 930-939.

30. Chiu-Ching Tuan, Yi-Chao Wu. Grid Header Election by Predetermining in Mobile Ad-Hoc Networks // Journal of Applied Science and Engineering. 2012. Vol. 15, no. 1. P. 69-78.

31. Imran Ihsan, Muhammad Abdul Qadir, Nadeem Iftikhar. Mobile Ad-Hoc Service Grid – MASGRID // International Journal of Electrical, Robotics, Electronics and Communications Engineering. 2007. Vol. 1, no. 5. P. 778-781.

32. Bhaskaran R., Madheswaran M. Performance Analysis of Congestion Control in Mobile Ad-hoc Grid Layer // International Journal of Computer Applications. February, 2010. Vol. 1, no. 20. P. 102-110.

33. Li J., Khan S., Li Q. An efficient event delivery scheme in mobile ad hoc communities // Int. J. Communication Networks and Distributed Systems. 2013. Vol. 10, no. 1. P.25–39.

34. An Approach to Ad hoc Cloud Computing / Kirby G., Dearle A., Macdonald A., Fernandes A. // Distributed, Parallel, and Cluster Computing. 2010. P. 1-6.

35. Forouzan B. A. TCP/IP Protocol Suite. McGraw-Hill, 2009. 1024 p.

36. OddCI: On-Demand Distributed Computing Infrastructure / Costa R., Brasileiro F., Filho G. L., Sousa D. M. // Proceedings of the 2nd Workshop on Many-Task Computing on Grids and Supercomputers (MTAGS'09), November 16th, 2009, Portland, Oregon, USA, Association for Computing Machinery, 2009, pp. 1-10.

37. Mustafa Sadeq Jaafar, Zinkin S. A., Pashchenko D. V. Reconfigurable network models for distributed computing systems // Proceedings of the Fourteenth International

Conference of Science and Technology “New Information Technologies and Systems” (NITIS-2017). Penza, Russia, November 22-24, 2017. P. 92-104.

38. Mustafa Sadeq Jaafar, Zinkin S. A. The Implementation of Global Computing Through the Mapping of Object-Oriented Petri Nets into the Architecture of Distributed Computing Systems // Proceedings of the Fourteenth International Conference of Science and Technology “New Information Technologies and Systems” (NITIS-2017). Penza, Russia, November 22-24, 2017. P. 105-116.

39. GPSS World Reference Manual. URL: http://www.minutemansoftware.com/reference/reference_manual.htm. Дата доступа 10.10.2018.

40. PIPE2: Platform Independent Petri net Editor 2. URL: <http://pipe2.sourceforge.net>. Дата доступа 10.10.2018.

41. Интеграция методов концептуального и поведенческого моделирования дискретно-событийных систем: I. Синтез и анализ концептуальной модели / Мустафа Садек Джафар, С. А. Зинкин, Д. В. Пащенко, У. Н. Пучкова // Кибернетика и программирование. 2016. № 6. С. 83-95.

42. Интеграция методов концептуального и поведенческого моделирования дискретно-событийных систем: II. Логико-алгебраические операционные модели и информационно-коммуникационные технологии / Мустафа Садек Джафар, С. А. Зинкин, Д. В. Пащенко, У. Н. Пучкова // Кибернетика и программирование. 2017. № 1. С. 75-93.

Поступила в редакцию 01.03.2019

Подписана в печать 28.03.2019

Reference

1. Antonopoulos N., Gillam L. (Eds). Cloud Computing. Principles, Systems and Applications. Springer. London, Dordrecht, New York, Heidelberg, 2010, 379 p.

2. Furht B., Escalante A. (Eds). Handbook of Cloud Computing. Springer. New York, Dordrecht, Heidelberg, London, 2010, 634 p.

3. Foster I., Zhao Y., Raicu I., Lu S. Cloud computing and grid computing 360-degree compared. Grid Computing Environments Workshop (GCE'08), 2008, pp. 1-10.

4. Kumar R., Jain K., Maharwal H., Jain N., Dadhich A. Apache CloudStack: Open Source Infrastructure as a Service Cloud Computing Platform. *International Journal of advancement in Engineering technology, Management and Applied Science (IJAETMAS)*, 2014, vol. 1, is. 2, pp. 111-116.

5. Foster I., Kesselman C., Nick J., Tuecke S. The Physiology of the Grid: An Open Grid Service Architecture for Distributed Systems Integration. 30 p. URL: <https://www.dcc.fc.up.pt/~ines/aulas/1314/CG/papers/physiology.pdf>. Дата доступа: 10.10.2018.

6. Advances in Grid Computing; ed. by Zoran Constantinescu. Published by InTech, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, 2011, 272 p.

7. Demichev A. P., Il'in V. A., Krjukov A. P. Vvedenie v grid-tehnologii. Preprint NII-JaF MGU 11/832. Moscow, 2007. 87 p. (In Russ.).

8. Foster I., Kesselman C. (Eds). The Grid. Blueprint for a new computing infrastructure. San Francisco, Morgan Kaufman Publ., 1999, 677 p.

9. Baker M., Apon A., Buyya R., Jin H.. In A. Kent & J. Williams (Eds) Cluster computing and applications. Encyclopedia of Computer Science and Technology, 2002, pp. 87-125.

10. Sadashiv N., Kumar S. M. D. Cluster, Grid and Cloud Computing: A Detailed Comparison. The 6th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE 2011), August 3-5, 2011. SuperStar Virgo, Singapore, 2011, pp. 477-482.

11. Jaiswal U. C. Study and Applications of Cluster Grid and Cloud Computing. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2012, vol. 3, no. 1, pp. 45-50. e-ISSN: 2278-067X, p-ISSN: 2278-800X.

12. Samah Mawia Ibrahim Omer, Amin Babiker A. Mustafa, Fatema Abdallah Elmahdi Alghali. Comparative study between Cluster, Grid, Utility, Cloud and Autonomic computing. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, 2014, vol. 9, is. 6, Ver. III, pp. 61. e-ISSN: 2278-1676, p-ISSN: 2320-3331.

13. Kahanwal B., Singh T. P. The Distributed Computing Paradigms: P2P, Grid, Cluster, Cloud, and Jungle. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, 2012, vol. 1, is. 2, pp. 183-187. ISSN (Online): 2278-5299,

14. Frank J. Seinstra, Jason Maassen, Rob V. van Nieuwpoort, Niels Drost, Timo van Kessel, Ben van Werkhoven, Jacopo Urbani, Cerial Jacobs, Thilo Kielmann, Henri E. Bal. Jungle Computing: Distributed Supercomputing beyond Clusters, Grids, and Clouds. Department of Computer Science, Vrije Universiteit, De Boelelaan 1081A, 1081 HV Amsterdam, The Netherlands, 2010, pp. 1-31.

15. Kumar R. Comparison between Cloud Computing, Grid Computing, Cluster Computing and Virtualization. *International Journal of Modern Computer Science and Applications (IJMCSA)*, January 2015, vol. 3, no.1, pp. 42-47.

16. Chen Rui, Meng Xiao-jing. Modeling of UDP Hole Punching in P2P Network Using Petri Net. *International Proceedings of Economics Development and Research*, 2012, vol. 49, pp. 150-154.

17. Park H., Ratzin R. I., Schaar M. Peer-to-Peer Networks: Protocols, Cooperation and Competition. Source Title: Streaming Media Architectures, Techniques, and Applications: Recent Advances, 2011, 33 p.

18. Mittal G., Kesswani N., Goswami K. A Survey of Current Trends in Distributed, Grid and Cloud Computing. *International Journal of Advanced Studies in Computer Science and Engineering (IJASCSE)*, 2013, vol. 2, no. 3, pp. 1-6.

19. Tanenbaum A. S., Maarten Van Steen. Distributed Systems: principles and paradigms. 2nd Edition. Pearson Education, Inc., 2007, 669 p.
20. Distributed and Cloud Computing From Parallel Processing to the Internet of Things. Kai Hwang, Geoffrey C. Fox, Jack J. Dongarra. Elsevier, 2012, 648 p.
21. Nicola R., Gorla D., Pugliese R. Global computing in a dynamic network of tuple spaces. *Science of Computer Programming*, 2007, no. 64, pp. 187–204.
22. Zinkin S. A., Mustafa Sadek Dzharfar. Razvitie informacionno-kommunikacionnyh infrastruktur raspredelennyh vychislitel'nyh sistem na osnove koncepcii "Set' – jeto komp'juter". *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2018, vol. 22, no.4 (79), pp. 75-93 (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-4-75-93.
23. Asynchronous Replication Engines. Sombers Associates, Inc., and W. H. Highleyman. November 2006, pp. 1-6.
24. Alireza Sour, Ahmad Habibzad Navin. Consistency of Data Replication Protocols in Database Systems: A Review. *International Journal on Information Theory (IJIT)*, 2014, vol. 3, no.4, pp. 19 – 32.
25. Saadat N., Rahmani A. M. PDDRA: A new prefetching based dynamic data replication algorithm in data grids. *Future Generation Computer Systems*, 2012, vol. 28, pp. 666-681.
26. Wu A.-H., Tan Z.-J., Wang W. Annotation Based Query Answer over In-consistent Database. *Journal of Computer Science and Technology*, 2010, vol. 25, pp. 469-481.
27. Mansouri N., Dastghaibfard G. H., Mansouri E. Combination of data replication and scheduling algorithm for improving data availability in Data Grids. *Journal of Network and Computer Applications*, 2013, vol. 36, pp. 711-722.
28. Mansouri N., Dastghaibfard G. H. A dynamic replica management strategy in data grid. *Journal of Network and Computer Applications*, 2012, vol. 35, pp. 1297-1303.
29. Liao X., Jin H., Yu L. A novel data replication mechanism in P2P VoD system. *Future Generation Computer Systems*, 2012, vol. 28, pp. 930-939.
30. Chiu-Ching Tuan, Yi-Chao Wu. Grid Header Election by Predetermining in Mobile Ad-Hoc Networks. *Journal of Applied Science and Engineering*, 2012, vol. 15, no. 1, pp. 69-78.
31. Imran Ihsan, Muhammad Abdul Qadir, Nadeem Iftikhar. Mobile Ad-Hoc Ser-vice Grid – MASGRID. *International Journal of Electrical, Robotics, Electronics and Communications Engineering*, 2007, vol. 1, no. 5, pp. 778-781.
32. Bhaskaran R., Madheswaran M. Performance Analysis of Congestion Control in Mobile Ad-hoc Grid Layer. *International Journal of Computer Applications*, February, 2010, vol. 1, no. 20, pp. 102-110.
33. Li J., Khan S., Li Q. An efficient event delivery scheme in mobile ad hoc communities. *Int. J. Communication Networks and Distributed Systems*, 2013, vol. 10, no. 1, pp.25–39.

34. Kirby G., Dearle A., Macdonald A., Fernandes A. An Approach to Ad hoc Cloud Computing. Distributed, Parallel, and Cluster Computing, 2010, pp. 1-6.
35. Forouzan B. A. TCP/IP Protocol Suite. McGraw-Hill, 2009, 1024 p.
36. Costa R., Brasileiro F., Filho G. L., Sousa D. M. OddCI: On-Demand Distributed Computing Infrastructure / Proceedings of the 2nd Workshop on Many-Task Computing on Grids and Supercomputers (MTAGS'09), November 16th, 2009, Portland, Oregon, USA, Association for Computing Machinery, 2009, pp. 1-10.
37. Mustafa Sadeq Jaafar, Zinkin S. A., Pashchenko D. V. Reconfigurable network models for distributed computing systems. Proceedings of the Fourteenth International Conference of Science and Technology "New Information Technologies and Systems" (NITIS-2017). Penza, Russia, November 22-24, 2017, pp. 92-104.
38. Mustafa Sadeq Jaafar, Zinkin S. A. The Implementation of Global Computing Through the Mapping of Object-Oriented Petri Nets into the Architecture of Distributed Computing Systems. Proceedings of the Fourteenth International Conference of Science and Technology "New Information Technologies and Systems" (NITIS-2017). Penza, Russia, November 22-24, 2017, pp. 105-116.
39. GPSS World Reference Manual. URL: http://www.minutemansoftware.com/reference/reference_manual.htm. Data dostupa 10.10.2018.
40. PIPE2: Platform Independent Petri net Editor 2. URL: <http://pipe2.sourceforge.net>. Data dostupa 10.10.2018.
41. Mustafa Sadek Dzhafer, Zinkin S. A., Pashhenko D. V., Puchkova U. N. Integracija metodov konceptual'nogo i povedencheskogo modelirovanija diskretno-sobytijnyh sistem: I. Sintez i analiz konceptual'noj modeli. *Kibernetika i programirovanie*, 2016, no. 6, pp. 83-95 (In Russ.).
42. Mustafa Sadek Dzhafer, Zinkin S. A., Pashhenko D. V., Puchkova U. N. Integracija metodov konceptual'nogo i povedencheskogo modelirovanija diskretno-sobytijnyh sistem: II. Logiko-algebraicheskie operacionnye modeli i infokommunikacionnye tehnologii. *Kibernetika i programirovanie*, 2017, no. 1, pp. 75-93 (In Russ.).

Received 01.03.2019

Accepted 28.03.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Мустафа Садек Джафар, аспирант,
кафедра вычислительной техники, Пензенский
государственный университет, г. Пенза,
Российская Федерация,
e-mail: mustafajaafar221087@gmail.com

Mustafa Sadeq Jaafar, Post-Graduate Student,
Department of Computer Engineering,
Penza State University, Penza, Russian Federation,
e-mail: mustafajaafar221087@gmail.com

УДК 004.9

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-174-185

Оценка эффективности локальной вычислительной сети при решении главной и обеспечивающих задач

В. Н. Николаев¹, С. И. Рогатин², Е. А. Коломиец¹ ✉, О. И. Атакищев³

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94

² АО «НИИ ТП», Россия, 127490, Москва, ул. Декабристов, владение 51

³ Институт инженерной физики, Россия, 115114, Москва, ул. Летниковская, 10 стр.

✉ e-mail: lenus07@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данной статьи является оценка производительности инфраструктуры СО ГПИ с учетом функционального предназначения и условий функционирования ее элементов. В качестве объекта исследования выбрана СО ГПИ как типовой элемент инфраструктуры АИС предприятия, на основе централизованной двухуровневой структуры ЛВС в составе АРМ и ЭВМ (серверов).

Методы. В статье представлена модель функционирования локальной вычислительной сети обработки геопространственной информации, организованной по технологии «клиент-сервер», учитывающей влияние на общую производительность параметров АРМ, выполняющих не главную, а обеспечивающую функцию. В современных условиях в значительной степени возросли объемы и разнообразие данных, используемых при планировании, организации и проведении крупных информационных проектов. Кроме данных систем космического мониторинга растет поток геодезической, метео- и геофизической информации, которую необходимо анализировать и учитывать при подготовке и проведении проектов. Уже сегодня необходимые разновидности данных в требуемых объемах не могут быть приняты, обработаны и интегрированы с использованием существующих технических средств наземной инфраструктуры.

Результаты. Выполненные в статье исследования показали, что фактор функциональной надежности существенно влияет на основные функциональные свойства рассматриваемых СО ГПИ. Поэтому необходимо принимать во внимание функциональную надежность элементов при анализе и выборе систем рассматриваемого класса.

Заключение. Противоречия, возникшие между возросшими потоками информации и имеющимися возможностями по их обработке и использованию, обуславливают необходимость использования новых средств, в частности построенных на принципах геоинформационной технологии и геопространственной информации.

Ключевые слова: система обработки геопространственной информации; локальная вычислительная сеть; процессы целевого функционирования; процессы обеспечения; коэффициент функциональной надежности и готовности; коэффициент потери производительности.

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

Для цитирования: Оценка эффективности локальной вычислительной сети при решении главной и обеспечивающих задач / В. Н. Николаев, С. И. Рогатин, Е. А. Коломиец, О. И. Атакищев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 174-185. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-174-185.

UDC 004.9

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-174-185

Assessment of Local Area Network Effectiveness when Solving the Main and Supporting Tasks

Viktor N. Nikolaev¹, Sergey I. Rogatin², Elena A. Kolomiyets¹ ✉,
Oleg. I. Atakishchev³

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

² JSC "Research Institute TP", 51, Dekabristov str, Moscow, 127490, Russian Federation

³ Institute engineering physics, 10, letnikovskaya str, Moscow, 115114, Russian Federation

✉ e-mail: lenus07@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. is to assess the performance of the infrastructure of the Data processing system (DPS) of graphic user interface (GUI), taking into account the functional purpose and operation conditions of its elements. The object of the study is the GUI DPS since it is a typical element of the automated-information system (AIS) infrastructure of an enterprise, based on the centralized two-level structure of LAN in automated working place (AWP) and computer (servers).

Methods. The article presents a model of functioning of a local area network for processing geospatial information, organized using the client-server technology, which takes into account the impact on the overall performance of AWP parameters that perform not the main function, but the supporting one. In modern conditions, the amounts and diversity of data used in planning, organizing and implementing large information projects significantly increased. In addition to data from space monitoring systems, the flow of geodesic, meteorological and geophysical information is growing, which needs to be analyzed and taken into account when preparing and conducting projects. Even today, the necessary types of data in the required amounts cannot be accepted, processed and integrated using the existing technical means of ground infrastructure.

Results. The research performed in the article showed that the functional reliability factor significantly affects the basic functional properties of the considered GUI DPS so it is necessary to take into account functional reliability of the elements when analyzing and choosing the systems of the class under consideration.

Conclusion. The contradictions that have arisen between the increased flows of information and the existing possibilities of their processing and use necessitate application of new tools, in particular, based on the principles of geo-information technology and geospatial information.

Keywords: geospatial information processing system; local area network; target functioning processes; provisioning processes; functional reliability and availability factor; performance loss ratio.

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

For citation: Nikolaev V. N., Rogatin S. I., Kolomiyets E. A., Atakishchev O. I. Assessment of Local Area Network Effectiveness when Solving the Main and Supporting Tasks. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(2): 174-185 (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-174-185.

Введение

Применение инновационных геоинформационных технологий в системах обработки информации показало их высокую эффективность при решении задач в интересах народного хозяйства [1-4].

Важной задачей в данной предметной области является оценка производительности систем обработки (СО) геопространственной информации (ГПИ), организованных в виде локальных вычислительных сетей (ЛВС) с АРМ различного функционального предназначения [5].

Применение автоматизированных информационных систем при обработке больших объемов разнотипной информации от средств космического мониторинга, растущие требования к уровню интеграции и времени формирования выходных массивов информации вызывают необходимость при организации обработки разнородной информации использовать многоуровневых распределенных информационно-вычислительных ресурсов коллективного пользования в виде ЛВС и учета самых разнообразных условий функционирования ее элементов [8, 9].

Известны математические модели, описывающие функционирование СО ГПИ при условии неизменности её состава и структуры в процессе эксплуатации [7]. Однако анализ особенностей построения и функционирования автоматизированных комплексов различного назначения показывает, что не всегда подсистемы и элементы СО, организо-

ванной в виде ЛВС, выполняют свое основное целевое предназначение по решению главной функциональной задачи. Часть ресурсов системы всегда решает не основные, а обеспечивающие задачи. При этом система будет находиться в следующих группах состояний.

1. Активное использование элемента, подсистемы, АРМ в составе ЛВС по своему целевому назначению – например обработке и ГПИ.

2. Отвлечение активных, работоспособных информационно-вычислительных и интеллектуальных ресурсов СО ГПИ для решения обеспечивающих задач:

- управления ресурсами в СО предприятия;
- защиты информации, циркулирующей в ЛВС;
- модернизации основных видов обеспечений;
- ремонта (восстановления, тестирования) элементов системы.

Использование ресурсов, элементов и видов обеспечений СО ГПИ не по прямому функциональному предназначению, т.е. для решения задач обеспечения, а также недостаточная надёжность технических и программных средств систем автоматизации существенно снижает эффективность использования автоматизированной системы в целом. В связи с этим важной является научная задача оценки производительности инфраструктуры СО ГПИ с учетом функционального предназначения и условий функционирования ее элементов [6, 10].

Материалы и методы решения задачи

В качестве объекта исследования выберем СО ГПИ как типовой элемент инфраструктуры АИС предприятия на основе централизованной двухуровневой структуры ЛВС в составе N АРМ и L ЭВМ (серверов). Вариант децентрализованной структуры на основе персональных ЭВМ может быть получен как частный случай централизованной структуры при значениях параметров $L=1$ и $N=1$.

Для оценки влияния фактора функциональной надежности необходимо выбрать соответствующую математическую модель. Примем, что все АРМ и ЭВМ в исследуемой структуре однотипные, при этом компоненты программного и технического обеспечения АРМ и ЭВМ решают задачи обеспечения или выходят из строя с интенсивностью α и ν , а восстанавливается с интенсивностью b и θ . Причем одновременно могут восстанавливаться только одно АРМ и одна ЭВМ. Вероятность того, что в такой системе с NL -структурой в любой момент времени работает n АРМ и l ЭВМ, равна [6]:

$$Q_{nl}^{(NL)} = Q_n^{(N)} \cdot Q_l^{(L)}, \quad (1)$$

где $Q_l^{(L)}$ $Q_n^{(N)}$ – вероятность того, что из N АРМ работает n ; $Q_l^{(L)}$ – вероятность того, что из L ЭВМ работает l .

С целью упрощения задачи анализа примем, что выход из строя ЭВМ и АРМ или их нецелевое использование происходит независимо. Предположим также, что поток отказов подчиняется закону Пуассона, а время восстано-

вления описывается экспоненциальным распределением.

Такое допущение, как показала практика эксплуатации различных информационно-вычислительных систем, вполне оправдано и приемлемо при выполнении инженерных расчетов на функциональную надежность систем данного класса.

В предложенной постановке процессы целевого надёжностного функционирования ЭВМ и АРМ могут быть описаны схемой «гибели и размножения» [6].

$$Q_n^{(N)} = \frac{\frac{N!}{n!} \left(\frac{a}{b}\right)^{N-n}}{\sum_{n=0}^N \frac{N!}{n!} \left(\frac{a}{b}\right)^{N-n}}, n = 1(1)N; \quad (2)$$

$$Q_l^{(L)} = \frac{\frac{L!}{l!} \left(\frac{\nu}{\theta}\right)^{L-l}}{\sum_{l=0}^L \frac{L!}{l!} \left(\frac{\nu}{\theta}\right)^{L-l}}, l = 1(1)L. \quad (3)$$

С функциональной точки зрения NL -структура будет работоспособной, если будет исправно хотя бы одно АРМ и одна ЭВМ (сервер). Поэтому для оценки функциональной надежности системы целесообразно ввести коэффициент функциональной надежности.

$$K_{\Phi}^{(NL)} = (1 - Q_{n=0}^{(N)}) (1 - Q_{l=0}^{(L)}), \quad (4)$$

$$\text{где } Q_n^{(N)} = \frac{N! \left(\frac{a}{b}\right)^N}{\sum_{n=0}^N \frac{N!}{n!} \left(\frac{a}{b}\right)^{N-n}}; \quad (5)$$

$$Q_l^{(L)} = \frac{L! \left(\frac{\nu}{\theta}\right)^L}{\sum_{l=0}^L \frac{L!}{l!} \left(\frac{\nu}{\theta}\right)^{L-l}}. \quad (6)$$

Следует заметить, что $K_{\Phi}^{(NL)}$ имеет физический смысл коэффициента функциональной оперативной готовности к работе, то есть это вероятность того,

что система хотя и потеряла ряд своих свойств для решения задач обеспечения, но осталась работоспособной по прямому назначению.

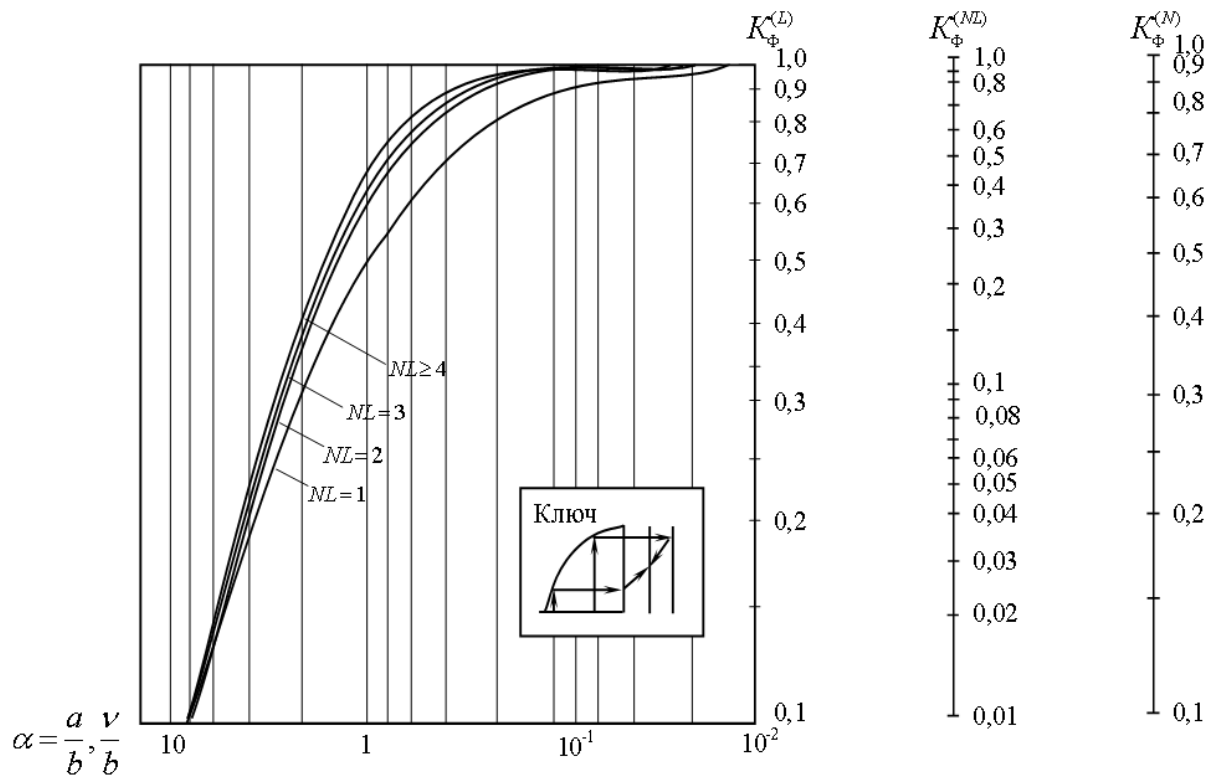


Рис. 1. Номограмма определения коэффициента функциональной надежности $K_{\Phi}^{(NL)}$ СО ГПИ с NL-структурой

На рис. 1 представлена разработанная номограмма для определения $K_{\Phi}^{(NL)}$ в зависимости от структурно-функциональных параметров системы N , L , a , b , ν , θ .

Как видно из номограммы влияние численности элементов в подсистемах на $K_{\Phi}^{(NL)}$ существенно лишь в диапазоне $5 \leq \frac{a}{b} \cdot \frac{\nu}{\theta} \leq 5 \cdot 10^{-2}$. Также заметим, что при $N, L \geq 4$ не происходит значительного изменения $K_{\Phi}^{(NL)}$. Вследствие этого можно сделать важный вывод о

том, что увеличение числа элементов в подсистемах СО ГПИ больше четырех практически не повышает оперативной функциональной готовности системы. В этом случае улучшение надежностных функциональных характеристик достигается путем повышения интенсивности использования элементов по целевому назначению, восстановлением или снижением интенсивности отказов за счет улучшения качества профилактических работ и введения методов программного и аппаратного контроля.

Исследуем на основе предложенной модели (1-5) как будет изменяться производительность СО ГПИ NL -структуры в зависимости от уровня функциональной надежности элементов и числа элементов в подсистемах. В качестве меры сравнения выберем коэффициент потери пропускной способности системы.

$$W = \frac{B_p^{(NL)}}{B^{(NL)}}. \quad (7)$$

Производительность абсолютно функционально надежной системы, используемой по своему прямому назначению, определяется по формулам (1-5) и равна [6]

$$B^{(NL)} = \mu \bar{L}_a, \quad (8)$$

где $\bar{L}_a$ – среднее число активных ЭВМ (серверов) в СО ГПИ NL -структуры.

Реальная производительность NL -структуры с учетом (1-5) будет равна

$$B_p^{(NL)} = \sum_{n=0}^N \cdot \sum_{l=0}^L B_{nl} \cdot Q_{nl}, n=1(1)N, l=1(1)L, \quad (9)$$

где B_{nl} – производительность системы с функционально надежной nl -структурой.

В полученном выражении (8) представлены в аналитическом виде все основные параметры анализируемой системы. Поэтому исследуем показатель (6) на чувствительность к параметрам структуры и к функционально надежным характеристикам элементов. Для облегчения анализа примем, что интенсивности выхода из строя и восстановления элементов системы одинаковы, то есть $\alpha = \frac{a}{b} = \frac{\nu}{\theta}$ $\alpha = \frac{a}{b} = \frac{\nu}{\theta}$. Такое

допущение вполне оправдано, так как в существующих СО ГПИ функциональная и схемотехническая сложность АРМ и ЭВМ и используемой программно-информационной среды являются сопоставимыми. Тогда для случая $L=1$ имеем следующее выражение

$$W = \frac{\sum_{n=0}^N \cdot \sum_{l=0}^L (1 - P_0^{(nl)}) \cdot Q_{nl}}{(1 - P_0^{(NL)})}. \quad (10)$$

На рис. 2 представлены зависимости, характеризующие потери производительности системы от числа элементов в подсистемах и их надежности.

Анализ графиков показывает, что потери производительности системы существенно зависят от числа АРМ N , их надежности a , интенсивности восстановления b , а также интенсивностей обработки информации в подсистемах λ и μ .

Причем коэффициент загрузки системы $\rho = \lambda/\mu$ при заданных функциональных характеристиках заметно влияет на потери производительности системы только в диапазоне $10^{-2} \leq a \leq 10$, в остальных случаях им при анализе можно пренебречь. Заметим, что в области $\rho > 0,1$ увеличение числа АРМ более 10-12 при любом уровне функциональной надежности элементов практически не изменяет установившегося уровня производительности.

Известно, что централизованная структура является предпочтительней в смысле общей производительности системы. Однако с функциональной точки зрения децентрализованная структура

при прочих равных условиях является более надежной.

Поэтому выбор рациональной структуры построения СО ГПИ с учетом

двух функциональных свойств системы (производительности и функциональной надежности) одновременно носит противоречивый характер.

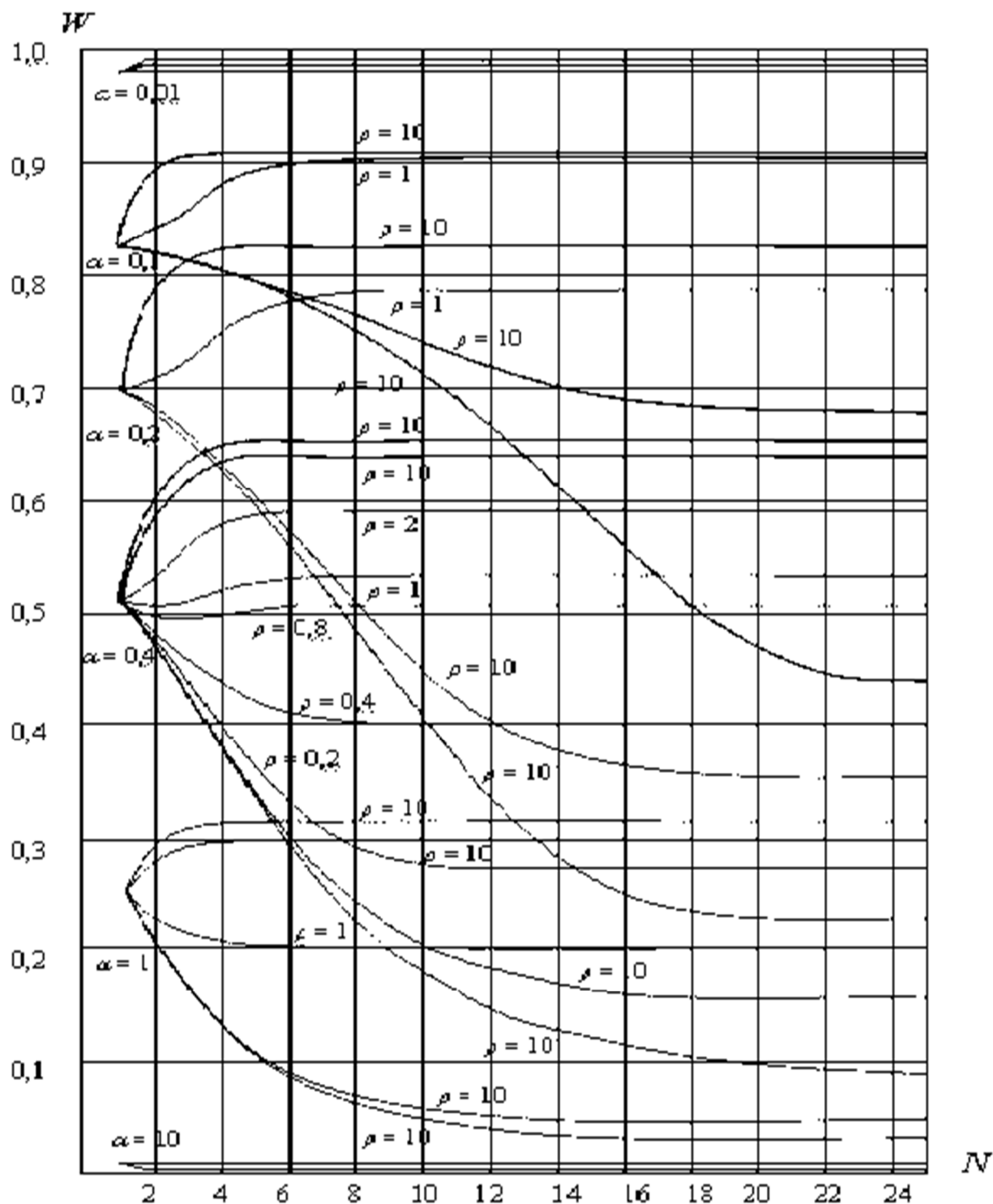


Рис. 2. Чувствительность коэффициента потери производительности системы W к параметрам N , ρ , α

В связи с этим исследуем уровень производительности СО ГПИ с учетом влияния структурных особенностей и фактора надежности. В процессе исследования примем аналогичный подход к сравнению конкурирующих вариантов построения. Сохраним также условие равенства суммарной интенсивности процессов преобразования ГПИ на каждой фазе обработки в системе. В качестве меры сравнения примем модифицированный показатель потери пропускной способности (производительности), отражающий структурные особенности построения СО ГПИ, характеристики подсистем и функциональную надежность элементов системы:

$$\delta(E, B, W) = 1 - \frac{B^{(1)}W^{(1)}}{B^{(2)}W^{(2)}}, \quad (11)$$

где $B^{(1)}$, $B^{(2)}$ – соответственно уровень производительности сравниваемых вариантов; $W^{(1)}$, $W^{(2)}$ – коэффициенты потери пропускной способности.

Показатель (10) определяет уровень выигрыша в пропускной способности двух видов исследуемых структур: децентрализованной и централизованной.

При $\delta(E, B, W) > 0$ централизованная структура является более предпочтительной; если $\delta(E, B, W) < 0$, то лучшей будет децентрализованная структура. На рис. 3 для ряда частных случаев приведены графики чувствительности показателя (10) к составу, характеристикам и функциональной надежности элементов СО ГПИ.

Анализ зависимостей на рис. 3 позволяет в наглядном виде получить границу предпочтительности двух видов структур при различных параметрах E, n, ρ, α . Так, при $\alpha > 0,2$ и $\rho < 1$ предпочтение следует отдать децентрализованной структуре. В случае $0 < \alpha < 1$ и $\rho > 1$ при любом числе элементов и уровне их надежности лучшей будет централизованная структура.

Результаты и их обсуждение

Произведена оценка влияния фактора функциональной надежности элементов двухуровневой СО ГПИ на ее функциональную оперативную готовность. Проведены исследования, позволяющие количественно оценить потери производительности системы такого класса в зависимости от функционального предназначения, надежности и числа элементов на каждом уровне построения СО ГПИ. Построена номограмма определения коэффициента функциональной надежности $Q_{\Phi}^{(NL)}$ СО ГПИ с NL-структурой.

Выводы

Выполненные исследования показали, что фактор функциональной надежности существенно влияет на основные функциональные свойства рассматриваемых СО ГПИ. Поэтому необходимо принимать во внимание функциональную надежность элементов при анализе и выборе систем рассматриваемого класса.

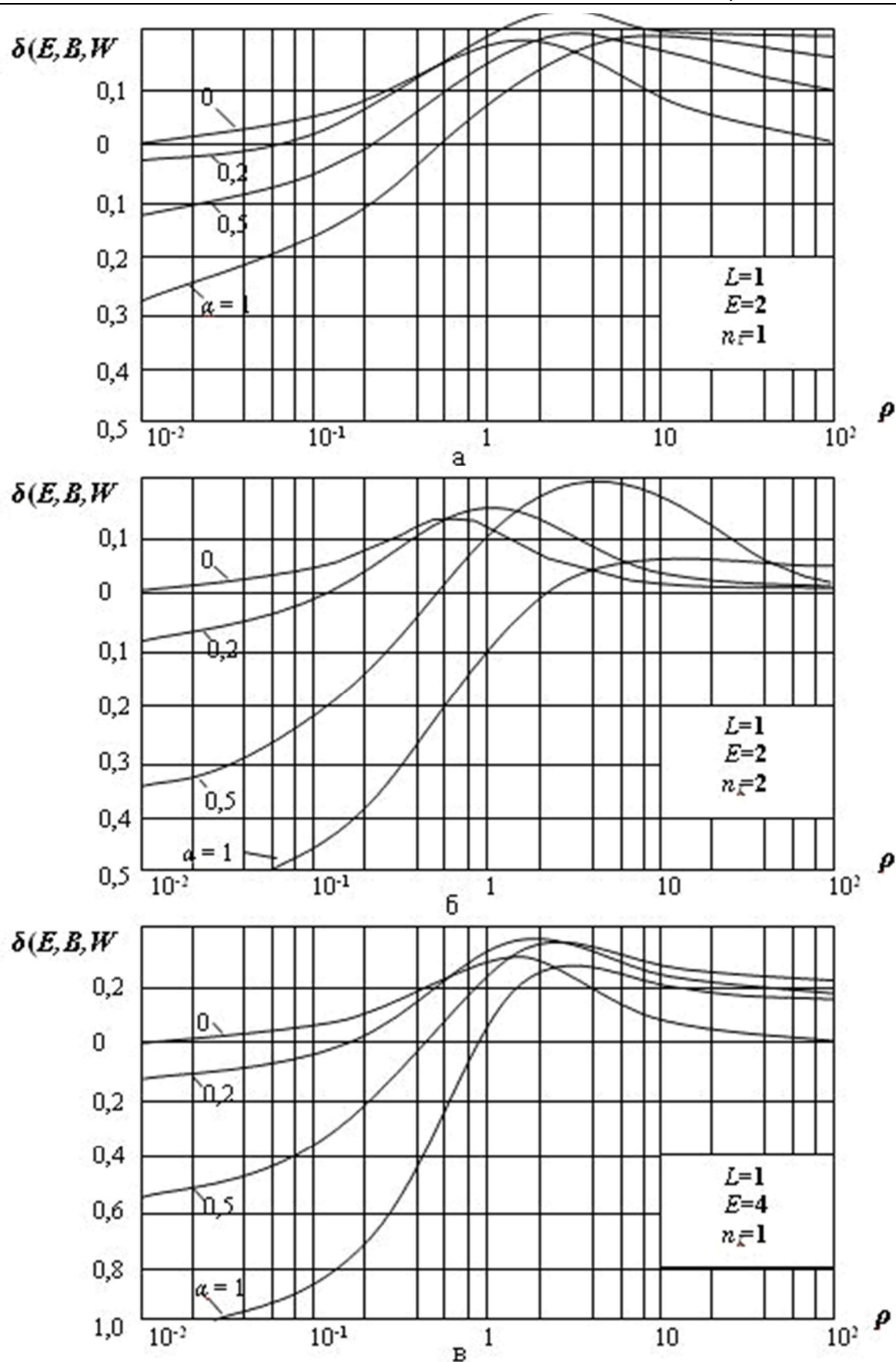


Рис. 3. Графики анализа функции предпочтительности $\delta(E, B, W)$ для различных вариантов построения СО ГПИ

Список литературы

1. Основные направления применения результатов космической деятельности в социально-экономических системах Курской области / В.Н. Николаев, А.М. Потапенко, В.Н. Новиков, И.В. Макарьин // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. 2016. № 8(18). С. 91-97.
2. Николаев В.Н. Принципы построения инновационной геоинформационной системы научно-промышленного предприятия // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. Т.55. № 2. С. 55-58.
3. Николаев В.Н. Геоинформационные и информационные технологии в телекоммуникациях // Телекоммуникации. 2016. № 5. С. 38-41.
4. Методология создания автоматизированных информационных систем коллективной обработки разнородной информации от средств аэрокосмического мониторинга / Г.В. Кузьмин, И.В. Макарьин, В.Н. Николаев, Н.Р. Стратилатов. Курск, 2018. 245 с.
5. Николаев В.Н., Маслак А.А Метод оценки и управления экономическими и интеллектуальными ресурсами инфраструктуры предприятия по критерию «эффективность-стоимость» // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. Т. 11. № 8. С. 46-49.
6. Николаев В.Н. Модель оценки надежности пропускной способности двухуровневой систем обработки геопространственной информации коллективного пользования // Системы управления и информационные технологии. 2006. Т.25. № 3. С. 23-26.
7. Вертакова Ю.В., Николаев В.Н., Макарьин И.В. Метод оценки стоимости транзакций при создании инновационной геоинформационной продукции // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 3-2(42). С. 112-117.
8. Николаев В.Н. Метод и устройство управления информационно-вычислительными ресурсами вида «клиент-сервер» // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 1. С. 208-211.
9. Николаев В.Н., Мяснянкина Д.В. Метод управления технико-экономическими ресурсами телекоммуникационной инфраструктуры геоинформационной системы предприятия // Телекоммуникации. 2014. № 11. С. 34-38.
10. Коломиец Е.А., Николаев В.Н. Автоматизированная обработка и формирование геопространственной информации в социальных системах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. № 5 (80). С. 82-95. DOI: 10.21869/222.3-1560-2018-22-5-82-95.

Поступила в редакцию 12.02.2019

Подписана в печать 28.03.2019

Reference

1. Nikolaev V. N., Potapenko A.M., Novikov V. N., Makarin I. V. Osnovnye napravleniya primeneniya rezul'tatov kosmicheskoi deyatel'nosti v sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh Kurskoi oblasti [The main directions of application of the results of space activities in the socio-economic systems of the Kursk region]. *Innovatsionnaya ekonomika: perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya* = *Innovative economy: prospects for development and improvement*, 2016, no. 8(18), pp. 91-97 (In Russ.).
2. Nikolaev V. N. Printsipy postroeniya innovatsionnoi geoinformatsionnoi sistemy nauchno-promyshlennogo predpriyatiya = [Principles of construction of innovative geoinformation system of scientific and industrial enterprise]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie* = *Proceedings of higher educational institutions. Instrument making*, 2012, vol. 55, no. 2, pp. 55-58 (In Russ.).
3. Nikolaev V. N. Geoinformatsionnye i informatsionnye tekhnologii v telekommunikatsiyakh [Geoinformation and information technologies in telecommunications]. *Telekommunikacii*, 2016, no. 5, pp. 38-41 (In Russ.).
4. Kuzmin G. V., Makarin I. V., Nikolaev V. N., Stratilatov N. R. Methodology of creation of automated information systems for collective processing of heterogeneous information from aerospace monitoring. Kursk, 2018, 245 p. (In Russ.).
5. Nikolaev V. N., Maslak A. Metod otsenki i upravleniya ekonomicheskimi i intellektual'nymi resursami infrastruktury predpriyatiya po kriteriyu "effektivnost'-stoimost'" [A Method of evaluation and management of economic and intellectual resources of enterprise infrastructure on the criterion of "efficiency-cost"]. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* = *Information-measuring and control systems*, 2013, vol. 11, no. 8, pp. 46-49 (In Russ.).
6. Nikolaev V. N. Model' otsenki nadezhnosti propusknoi sposobnosti dvukhurovnevoi sistem obrabotki geoprostranstvennoi informatsii kollektivnogo pol'zovaniya [Model of estimation of reliability of carrying capacity of two-level systems of processing of geospatial information of collective use]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* = *Control systems and information technologies*, 2006, vol. 25, no. 3, pp. 23-26 (In Russ.).
7. Vertakova J. V., Nikolaev V. N., Makarin I. V. Metod otsenki stoimosti tranzaktsii pri sozdanii innovatsionnoi geoinformatsionnoi produktsii [The method of valuation of transactions in the creation of innovative geoinformation products]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 3-2(42), pp. 112-117 (In Russ.).
8. Nikolaev V. N. Metod i ustroistvo upravleniya informatsionno-vychislitel'nymi resursami vida "klient-server" [Method and device of management of information and computing resources of the "client-server" type]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* =

Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing engineering, Information science. Medical instruments engineering, 2013, no. 1, pp. 208-211 (In Russ.).

9. Nikolaev V. N., Myasnyankina D. V. Metod upravleniya tekhniko-ekonomicheskimi resursami telekommunikatsionnoi infrastruktury geoinformatsionnoi sistemy predpriyatiya [The method of control of technical-economic resources of the telecommunications infrastructure geographic information system of enterprise telecommunications]. *Telekommunikacii*, 2014, no. 11, pp. 34-38 (In Russ.).

10. Kolomiets E. A., Nikolaev V. N. Avtomatizirovannaya obrabotka i formirovanie geoprostranstvennoi informatsii v sotsial'nykh sistemakh [Automated processing and formation of geospatial information in social systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, no. 5 (80), pp. 82-95. (In Russ.). DOI: 10.21869/222.3-1560-2018-22-5-82-95.

Received 12.02.2019

Accepted 28.03.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Виктор Николаевич Николаев, доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем и технологий, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nikovic54@yandex.ru

Viktor N. Nikolaev, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nikovic54@yandex.ru

Сергей Иванович Рогатин, кандидат экономических наук, начальник планово-экономического отдела, АО «НИИ ТП» г. Москва, Российская Федерация, e-mail: sergey.rogatin@niitp.ru

Sergey I. Rogatin, Candidate of Economic Sciences, Head of Planning and Economic Department JSC "Research Institute TP", Moscow, Russian Federation, e-mail: sergey.rogatin@niitp.ru

Елена Александровна Коломиец, аспирант, кафедры и информационных систем и технологий, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: lenus07@yandex.ru

Elena A. Kolomiyets, Post-Graduate Student, Department of Information Systems and Technologies, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: lenus07@yandex.ru

Олег Игоревич Атакищев, доктор технических наук, профессор, заместитель директора Института инженерной физики, Московское представительство, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: aoi007@mail.ru

Oleg I. Atakishiev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Deputy Director of the Institute Engineering Physics, Moscow, Russian Federation, e-mail: aoi007@mail.ru

УДК 628.4

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-186-201

Информационные технологии для оценки риска здоровью населения от выбросов полигона твердых коммунальных отходов

И.О. Кирильчук¹ ✉, О.Е. Кондратьева², О.А. Локтионов², В.В. Юшин¹

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94

² МЭИ, Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14

✉ e-mail: iraida585@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Одной из наиболее актуальных экологических проблем является образование отходов производства и потребления, при этом основная масса отходов не вовлекается во вторичный хозяйственный оборот, а размещается на полигонах и свалках, представляющих серьезную экологическую опасность для окружающей среды и здоровья населения. Авторы статьи обосновывают необходимость применения современных информационных технологий для качественного и количественного анализа состава выбросов, комплексной оценки экологического состояния вблизи источников загрязнения, изучения причинно-следственных связей в системе «окружающая среда – здоровье населения», оценки риска для здоровья с целью последующего обоснования приоритетных управленческих решений по обеспечению экологической безопасности населения.

Методы. Основным методом, используемым для оценки негативного воздействия полигона твердых коммунальных отходов на здоровье населения, проживающего в зоне его влияния, является использование концепции оценки и анализа риска.

Результаты. Особое внимание в статье уделено анализу информационных технологий, применяемых при оценке риска здоровью населения от выбросов полигонов твердых коммунальных отходов, рассмотрены примеры использования программных продуктов на различных этапах оценки риска здоровью населения от выбросов полигона ТКО г. Курска. Для учета специфических неопределенностей, которые обусловлены особенностями функционирования полигонов твердых коммунальных отходов как источника риска, авторами разработана электронная база данных морфологического состава и объектов размещения ТКО.

Заключение. Разработанная база данных позволит максимально нивелировать неопределенности, возникающие при оценке риска здоровью населения от выбросов полигонов твердых коммунальных отходов и, соответственно, повысит объективность получаемых результатов оценки риска.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы; полигон; оценка риска здоровью; информационные технологии; неопределенность; база данных..

Благодарности: Работа выполнена в рамках Гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК-941.2019.5.

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

Для цитирования: Информационные технологии для оценки риска здоровью населения от выбросов полигона твердых коммунальных отходов / И.О. Кирильчук, О.Е. Кондратьева, О.А. Локтионов, В.В. Юшин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 186-201. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-186-201.

UDC 004.9

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-186-201

Information Technologies for Assessing the Risk to Public Health from Emissions of Municipal Solid Waste Landfills

Iraida O. Kiril'chuk¹ ✉, Olga E. Kondrat'yeva², Oleg. A. Laktionov²,
Vasiliy V. Yushin¹

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

² National Research University, 14, Krasnoznamennaya str., Moscow, 111250, Russian Federation

✉ e-mail: iraida585@mail.ru

Abstract

Purpose of research. One of the most pressing environmental problems is the formation of production and consumption waste; moreover, the bulk of the waste is not involved in the circular economy but is disposed at landfills and waste dumps that pose a serious ecological hazard to the environment and public health. The authors of the article substantiate the need to apply modern information technologies for a qualitative and quantitative analysis of the composition of emissions, a comprehensive assessment of the environmental state near sources of pollution, a study of cause-effect relationships in the 'environment – public health' system, and health risk assessment for the subsequent justification of the priority management decisions to ensure the environmental health and public safety.

Methods. The main method used to assess the negative impact of municipal solid waste landfills on the health of the population living in the areas of their effect is the concept of risk assessment and analysis.

Results. Particular attention was paid to the analysis of information technologies used in assessing the risk to public health from emissions of landfills of municipal solid waste; examples of using software products at various stages of assessing the risk to public health from emissions from Kursk landfill were considered. To take into account the specific uncertainties that are due to the peculiarities of the functioning of municipal solid waste landfills as risk sources, the authors developed an electronic database of the municipal solid waste morphological composition and landfill facilities.

Conclusion. The developed database will allow us to level the uncertainties that arise in assessing the risk to public health from emissions of municipal solid waste landfills to the extent possible, and, so, increase the objectivity of the obtained risk assessment results.

Keywords: municipal solid waste; landfill; assessment of the risk to public health; information technologies; uncertainty; database.

Acknowledgements: The reported study was funded by Grant of the President of the Russian Federation for young scientists MK-941.2019.5.

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

For citation: Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S., Vanin I.V. Information Technologies for Assessing the Risk to Public Health from Emissions of Municipal Solid Waste Landfills. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(2): 186-201 (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-186-201.

Введение

Одной из наиболее значимых экологических проблем является образование отходов производства и потребления. По данным на 2017 г. ежегодно в Российской Федерации образуется примерно 4 млрд. тонн отходов производства и потребления, из которых 55 - 60 млн. тонн составляют твердые коммунальные отходы (ТКО). К сожалению, основная масса ТКО не вовлекается во вторичный хозяйственный оборот, а размещается на полигонах и свалках. Около 15 тыс. санкционированных объектов размещения отходов занимают территорию общей площадью примерно 4 млн. гектаров, и эта территория ежегодно увеличивается на 300 - 400 тыс. гектаров.

Негативными последствиями захоронения ТКО на полигонах являются [1]:

- отчуждение больших участков земли из хозяйственного оборота на длительный срок;
- потеря полезных компонентов ТКО, которые могли бы быть утилизированы;
- возможное загрязнение почвы и грунтовых вод токсичными веществами и ядовитым свалочным фильтратом, выделяющимися из отходов;
- загрязнение атмосферы веществами, входящими в состав биогаза, выделяющегося с тела полигона и являющегося конечным продуктом биотермического анаэробного распада органической составляющей отходов под воздействием микрофлоры;

– периодическое возгорание отходов из-за скопления биогаза в больших количествах.

В этой связи актуальной является **цель данного исследования**, состоящая в оперативной оценке негативного воздействия полигона твердых коммунальных отходов на здоровье населения, проживающего в зоне его влияния, за счет использования концепции оценки и анализа риска [2].

Материалы и методы решения задачи

Оценка риска для здоровья человека – это количественная и/или качественная характеристика вредных эффектов, способных развиться в результате воздействия факторов среды обитания человека на конкретную группу людей при специфических условиях экспозиции [3].

Оценка риска, как правило, осуществляется в соответствии со следующими этапами.

1. Идентификация опасности – выявление потенциально вредных факторов, оценка связи между изучаемым фактором и нарушениями состояния здоровья человека, достаточности и надежности имеющихся данных об уровнях загрязнения различных объектов окружающей среды исследуемыми веществами; составление перечня приоритетных химических веществ, подлежащих последующей характеристике.

2. Оценка зависимости "доза - ответ" – выявление количественных связей между показателями состояния здоровья и уровнями экспозиции.

3. Оценка экспозиции химических веществ на человека — характеристика источников загрязнения, маршрутов движения загрязняющих веществ от источника к человеку, пути и точки воздействия, определение доз и концентраций, установление уровней экспозиции.

4. Характеристика риска — анализ всех полученных данных, расчет рисков для популяции и ее отдельных подгрупп, сравнение рисков с допустимыми уровнями, сравнительная оценка и ранжирование различных рисков по степени их значимости, установление медицинских приоритетов и тех рисков, которые должны быть предотвращены или снижены до приемлемого уровня.

Необходимость использования информационных технологий для каче-

ственного и количественного анализа состава выбросов, комплексной оценки экологического состояния вблизи источников загрязнения, изучения причинно-следственных связей в системе «окружающая среда — здоровье населения», оценки риска для здоровья с целью последующего обоснования приоритетных управленческих решений по обеспечению экологической безопасности населения сегодня не вызывает сомнений.

На первом этапе при идентификации опасности рассчитываются выбросы от тела полигона (биогаз) в соответствии с утвержденной методикой [4]. Примерный состав биогаза приведен в таблице 1.

Таблица 1

Среднестатистический состав биогаза

№	Компонент	Весовое содержание в биогазе $C_{\text{вс. } i}, \%$
1	Метан	52,915
2	Толуол	0,723
3	Аммиак	0,533
4	Ксилол	0,443
5	Углерода оксид	0,252
6	Азота диоксид	0,111
7	Формальдегид	0,096
8	Этилбензол	0,095
9	Ангидрид сернистый	0,070
10	Сероводород	0,026

Рассмотрим программные продукты, реализующие, в том числе, методику расчета количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых ком-

мунальных отходов [5]. К таким программным продуктам можно отнести программный комплекс «Эколог» производства фирмы «Интеграл», экологический программный комплекс «Роса»,

производителем которого является ООО «Предприятие "ЛиДа инж.», программный комплекс «Эра-Воздух» НПП «Логос-Плюс», программный комплекс «Чистый воздух» фирмы «Лазурит», а также УПРЗА «ЭКО Центр», разработанную ООО «ЭКО центр» г. Воронеж.

Наиболее распространенным на территории РФ являются программные комплексы фирмы «Интеграл» и ООО «ЭКО Центр», в связи с этим остановимся более подробно на рассмотрении функциональных возможностей данных программных продуктов.

Программный комплекс «Эколог»
(Фирма «Интеграл»).

Программы расчета валовых выбросов позволяют автоматизированно рассчитать состав и количество (г/с и т/год) выбрасываемых в атмосферу примесей от различных производств. Программы снабжены удобными средствами управления: диалоговые окна, списки для выбора, кнопки обработки, меню-закладки. Данный программный продукт кроме расчетов валовых выбросов позволяет:

- рассчитывать приземные концентрации как отдельных веществ, так и групп веществ с суммирующим вредным действием;
- определять границы нормативных санитарно-защитных зон;
- заносить и редактировать карту-схему предприятия и местности, на которую будут нанесены результаты расчета рассеивания;
- выдавать карты изолиний приземных концентраций вредных веществ

на местности в пользовательском масштабе.

Печать отчетов производится как на принтер, так и в файл. Объем отчета регулируется пользователем.

Экологический программный комплекс «Роса» (ООО «Предприятие "ЛиДа инж.»).

Программа создана с использованием современных технологий программирования и передовых средств разработки программного обеспечения, использует эффективные системы хранения, обработки и представления информации. Программа разработана с учетом многолетнего собственного опыта подготовки экологической проектной документации.

Интерфейс, дизайн и функциональные возможности программы отвечают требованиям современных пользователей к профессиональному программному обеспечению. Программа работает в операционных системах семейства Windows, включая Windows Vista.

Программный комплекс «Эра-Воздух» (НПП "Логос-Плюс").

К достоинствам ПК «ЭРА-Воздух» относятся:

- единая управляющая оболочка, объединяющая расчет выбросов загрязняющих веществ, проведение инвентаризации источников загрязнения атмосферы, расчет концентраций, допустимых выбросов;
- оформление документов в формате Microsoft Word и Microsoft Excel;
- автоматическое заполнение таблиц инвентаризации результатами рас-

четов выбросов ЗВ в атмосферный воздух по методикам от различных производств;

- встроенный графический редактор (ГИС-модуль), который предоставляет широкие возможности построения карт-схем местности с нанесенными на них результатами расчетов загрязнения атмосферного воздуха [6];

- «визуальный» ввод ИЗА любого типа (точечный, линейный, площадной);

- различные варианты автоматического построения нормативной и расчетной санитарно-защитной зоны.

Программный комплекс

«Чистый воздух» (фирма "Лазурит")

Программный комплекс фирмы "Лазурит" «Чистый воздух» предназначен для автоматизации наиболее трудоемких и часто повторяющихся видов работ экологических, производственных и экономических служб промышленных предприятий, контроля воздействия на атмосферный воздух и принятия управленческих, проектных, технических, технологических и инвестиционных решений в области охраны атмосферного воздуха.

Основной упор при разработке программы сделан на стандартизацию, унификацию и автоматизацию обработки данных, формирования таблиц и пояснительной записки проекта. Удобство работы с программным комплексом достигается за счет того, что в нем используются стандартные элементы управления Windows.

УПРЗА «ЭКО центр»

Программа включает в себя много различных методик для расчета. Данные методики предназначены для расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от различных предприятий и источников. Например, рассчитать выброс загрязняющих веществ от полигонов ТКО можно с помощью программы Полигон ТБО 1.0. Кроме того, программа позволяет рассчитать приземные концентрации загрязняющих веществ в атмосфере в соответствии с методикой, утвержденной приказом Минприроды России от 06.06.2017 N 273.

Встроенные средства создания и редактирования графической топоосновы в географической системе координат позволяют без труда привязать растры из программы Google Earth Pro; строить санитарно-защитные (буферные) зоны; работать с источниками выброса, фоновыми постами, расчетными площадками и точками непосредственно на карте.

Результаты и их обсуждение

В таблицу 2 сведен сравнительный анализ рассмотренных программных продуктов.

В качестве примера рассмотрим полигон расчет выброса от полигона ТКО г. Курска (рис.1).

Исходные данные для расчета полигона ТКО г. Курска представлены в таблице 3.

Таблица 2

**Сравнительный анализ программных продуктов в области
воздухоохранной деятельности**

Программный продукт	Разработчик	Цена, руб.	Наличие скидки	Открытый доступ	Формы	Совместимость с другими программами	Демо-версия	Согласование	Возможности	Видеоуроки	Примечание
ЭПК РОСА	«ЛиДа инж.»	От 30 000	До 90%	-	+	+	+	+	+	-	Обучение проектировщиков
УПРЗА «Эколог»	«Интегралл»	От 20 000	+	-	+	+	+	+	+	-	Курсы, семинары
ПК «Эра-Воздух»	«ЛОГ УС»	От 30 000	До 75%	-	+	+	-	+	+	-	Платное обучение работе в ПП
УПРЗА «ЭКО центр»	«ЭКО центр»	-	-	+	+	+	-	+	+	+	

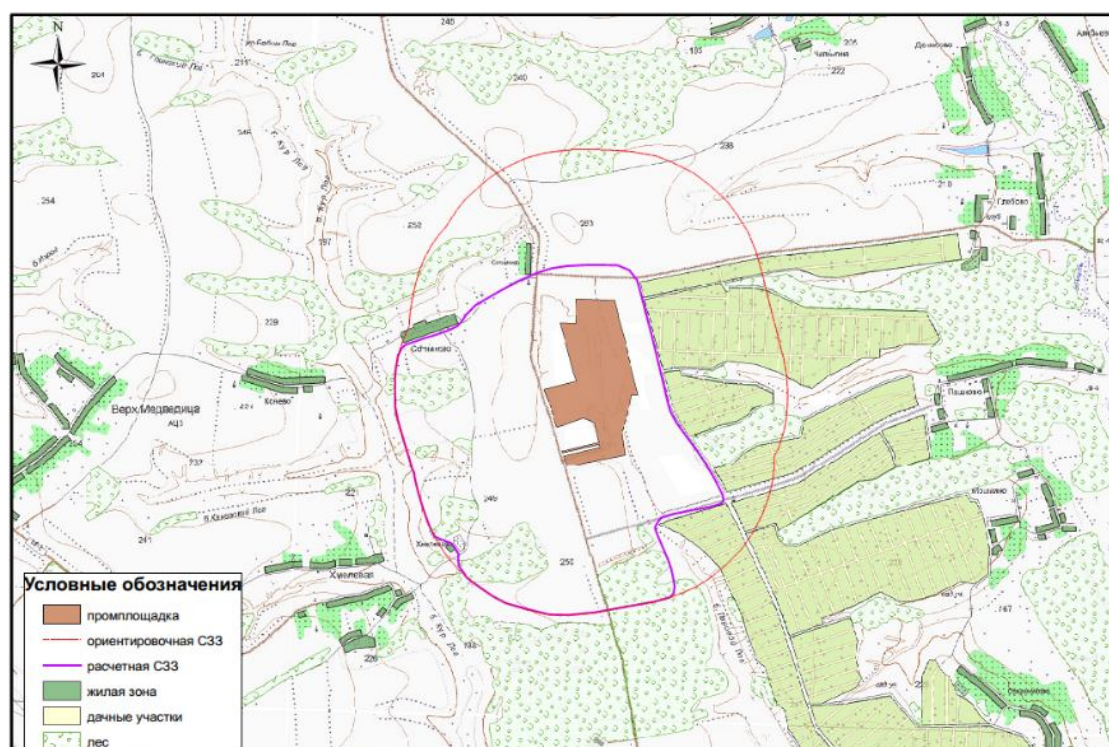


Рис. 1. Ситуационный план района расположения полигона ТКО г. Курска

Таблица 3

Параметры полигона ТКО г. Курска

Расчётный параметр	Единица	Значение
Период функционирования полигона	лет	37
Количество отходов в год	т	211445
Органические составляющие	%	43
Жироподобные вещества	%	2
Углеродоподобные вещества	%	71
Белковые вещества	%	12
Влажность	%	61

Расчет выбросов от полигона ТКО осуществляется с помощью программы Полигон ТБО 1.0.1, разработанной ООО «ЭКО центр». Результаты расчета представлены в таблице 4.

На третьем этапе оценки риска здоровью населения (оценка экспозиции химических веществ на человека) осуществляется расчет концентраций приоритетных химических веществ путем

моделирования рассеивания выбросов. Для этих целей применяются те же программные продукты, что используются для расчета валовых выбросов от различных производств (табл.1). На основе расчета приземной концентрации в дальнейшем определяется канцерогенный (рис.2) и неканцерогенный риск для здоровья населения от воздействия выбросов полигона ТКО.

Таблица 4

Количественный состав выбросов полигона ТКО

Наименование веществ	Выброс вещества		%
	г/сек	т/год	
Метан	447,164	7683,666	95,709
Толуол	6,1098	104,985	1,308
Аммиак	4,504	77,395	0,964
Ксилол	3,743	64,327	0,801
Углерод оксид	2,610	38,385	0,478
Азота диоксид	1,065	17,005	0,212
Формальдегид	0,811	13,939	0,174
Этилбензол	0,802	13,794	0,172
Сера диоксид	0,609	10,318	0,129
Сероводород	0,219	3,775	0,047



Рис. 2. Пространственное распределение уровней индивидуального канцерогенного риска от воздействия формальдегида

Вместе с тем, в ходе оценки рисков здоровью населения на каждом этапе могут возникать неопределенности, которые во многом определяются характером источника загрязнения (например, полигон ТКО) и особенностями территории, где проживает население. Естественным, что наличие таких неопределенностей может потребовать либо внесения корректировок в процессы расчета параметров риска с использованием существующих информационных технологий, либо разработки новых.

Рассмотрим неопределенности, которые были выявлены при оценке риска

здоровью населения от выбросов полигона ТКО г. Курска [7].

1. Идентификация опасности. К неопределенностям, имеющим место на данном этапе оценки риска, можно отнести следующие:

– сведения о количественных критериях, необходимых для последующего анализа риска для здоровья (референтные дозы и концентрации, факторы канцерогенного потенциала), представлены в соответствии с руководством [3], однако по ряду веществ в нем сведения устарели (например, толуол, ксилол);

- отсутствуют данные по фоновым среднегодовым концентрациям;

- сведения по количественному составу выбросов во многом зависят от объема отходов на полигоне, информация о котором предоставляется владельцем полигона и не всегда соответствует действительности;

- объем выделяющегося биогаза во многом зависит от компонентного состава ТКО, определением которого в г. Курске никто не занимался;

- компонентный состав отходов в теле полигона может существенно меняться с течением времени в зависимости от различных факторов, например, возгорания отходов на полигонах.

2. Оценка зависимости "доза - ответ". К неопределенностям, имеющим место на данном этапе оценки риска, можно отнести следующие: не учитывается возможность трансформации веществ, способная привести к изменению количества, концентрации веществ и потенциального воздействия на здоровье, но методически и законодательно данная процедура не оформлена.

3. Оценка экспозиции химических веществ на человека. К неопределенностям данного раздела следует отнести:

- отсутствие четкого нормативно-методического определения пригодности методик моделирования рассеивания химических веществ в атмосфере для целей оценки риска для здоровья;

- существует опасность завышения получаемых расчетных концентраций, которое приведет к завышению потен-

циального риска для здоровья и неоправданным затратам на оздоровительные и природоохранные мероприятия.

4. Характеристика риска.

- отсутствуют данные по фоновым среднегодовым концентрациям;

- не учитывается возможность трансформации веществ.

Рассмотрим неопределённость, связанную с влиянием компонентного состава отходов на объем биогаза.

Органические вещества, содержащиеся в отходах, обладают различной интенсивностью разложения [8] и, соответственно, делятся на быстроразлагаемые, среднеразлагаемые и медленноразлагаемые (табл.5).

Удельный выход биогаза за период его активной стабилизированной генерации при метановом брожении определяется [4] по уравнению

$$Q_w = 10^{-6} \cdot R \cdot (100 - W)$$

$$(0,92 \cdot Ж + 0,62 \cdot У + 0,34 \cdot Б),$$

где Q – удельный выход биогаза за период его активной генерации, кг/кг;

W – влажность отходов, %;

R – содержание органической составляющей в отходах, %;

$Ж$ – содержание жироподобных веществ в органике отходов (определяется методом экстрагирования), %;

$У$ – содержание углеводоподобных веществ в органике отходов (определяется методом гидролиза), %;

$Б$ – содержание белковых веществ в органике отходов (определяется по методике), %.

Таблица 5

Виды отходов по интенсивности разложения и содержанию биоразлагаемого углерода

Тип отходов		Содержание биоразлагаемого углерода, % масс
Быстроразлагаемые	Пищевые отходы	15
Среднеразлагаемые	Растительные отходы	20
	Другое (подгузники, отсев и т.д.)	10
Медленноразлагаемые	Бумага, картон	40
	Текстиль	24
	Дерево	43

Таким образом, можно считать, что от морфологического состава отходов зависит интенсивность образования и выделения биогаза и в зависимости от него и от климатических условий колеблется продолжительность периода стабилизированного активного выхода биогаза.

Для определения R , $Ж$, $У$ и $Б$ должны отбираться пробы отходов и проводиться соответствующие анализы. На практике, при расчете выхода биогаза от тела полигона принимаются данные, приведенные в методике [4] ($R = 55\%$, $Ж = 2\%$, $У = 83\%$, $Б = 15\%$, $W = 47\%$). Это обосновывается тем, что в методике приводится очень спорное утверждение, что морфологический состав ТКО для различных регионов РФ примерно одинаков и мало отличается от состава ТКО, полученного по усредненным данным исследований по Московскому региону. На самом деле, в разных регионах морфологический состав ТКО сильно отличается. Так содержание пищевых отходов может меняться от 5% (г. Санкт-Петербург, 2009 г.) до

44% (г. Тольятти), полимеров от 3% (г. Тюмень) до 41% (г. Москва, 2001 г.), стекла от 2,5% (г. Ставрополь) до 16,8% (г. Архангельск) [9]. Для решения данной проблемы разработана электронная база данных морфологического состава и объектов размещения ТКО.

В широком смысле слова база данных (БД) – это совокупность сведений о конкретных объектах. При создании базы данных в основном преследуется цель упорядочить данные по различным признакам, чтобы иметь возможность быстро извлекать нужную информацию. В современной технологии баз данных предполагается, что создание БД, ее поддержка, управление, а так же доступ пользователей к самим данным осуществляется с помощью специальных программных продуктов – систем управления базами данных (СУБД) [10].

Разработанная база данных содержит (табл.6) сведения о населенном пункте (климатическая зона, область, численность населения, прожиточный минимум), полигоне (ах), куда вывозятся ТКО, и усредненном морфологиче-

ском составе ТКО для данного региона (населенного пункта), взятом из официальных открытых источников (региональные программы в области обращения с отходами, территориальные схемы обращения с отходами, диссертации, статьи и т.д.).

Данные, хранящиеся в разработанной базе данных, распределены по сле-

дующим таблицам: Климатическая Зона, Округ, Зона Округа, Область, Населенный Пункт, Полигон, Компонент, Процентный Состав. Структура некоторых таблиц и описание их столбцов представлены в таблице 7. Схема данных разработанной БД представлена на рисунке 3.

Таблица 6

Фрагмент реляционной таблицы

Климатические Зоны	Округи	Области	Населенные пункты	Численность населения	Прожиточный минимум	Полигоны	Компоненты	Процентный состав
Умеренно-континентальный	Центральный	Курская	Курск	500000	7500	АО «САБ по уборке г. Курска	Бумага	2

Таблица 7

Макеты таблиц разработанной базы данных

Имя поля (Field name)	Тип Данных (data type)	Размер (size)	Ключ (key)
Макет таблицы «Климатическая Зона»			
КодЗоны	Счетчик	Длинное целое	Да
Название	Текстовый	255	Нет
Макет таблицы «Округ»			
КодОкруга	Счетчик	Длинное целое	Да
Название	Текстовый	255	Нет
Макет таблицы «Зона Округа»			
КодЗоныОкруга	Счетчик	Длинное целое	Да
КодЗоны	Числовой	Длинное целое	Нет
КодОкруга	Числовой	Длинное целое	Нет
Макет таблицы «Область»			
КодОбласти	Счетчик	Длинное целое	Да
Наименование	Текстовый	255	Нет
КодОкруга	Числовой	Длинное целое	Нет

Имя поля (Field name)	Тип Данных (data type)	Размер (size)	Ключ (key)
Макет таблицы «НаселенныйПункт»			
КодПункта	Счетчик	Длинное целое	Да
НазваниеПункта	Текстовый	255	Нет
КодОбласти	Числовой	Длинное целое	Нет
Макет таблицы «Полигоны»			
КодПолигона	Счетчик	Длинное целое	Да
Название	Текстовый	255	Нет
Оператор	Текстовый	255	Нет
КодПункта	Числовой	Длинное целое	Нет
Макет таблицы «Компоненты»			
КодКомпонента	Счетчик	Длинное целое	Да
НаваниеКомпонента	Текстовый	255	Нет
Макет таблицы «ПроцентыСостав»			
КодСостава	Счетчик	Длинное целое	Да
КодКомпонента	Числовой	Длинное целое	Нет
КодПолигона	Числовой	Длинное целое	Нет
Процент	Числовой	Одинарное с плавающей точкой	Нет

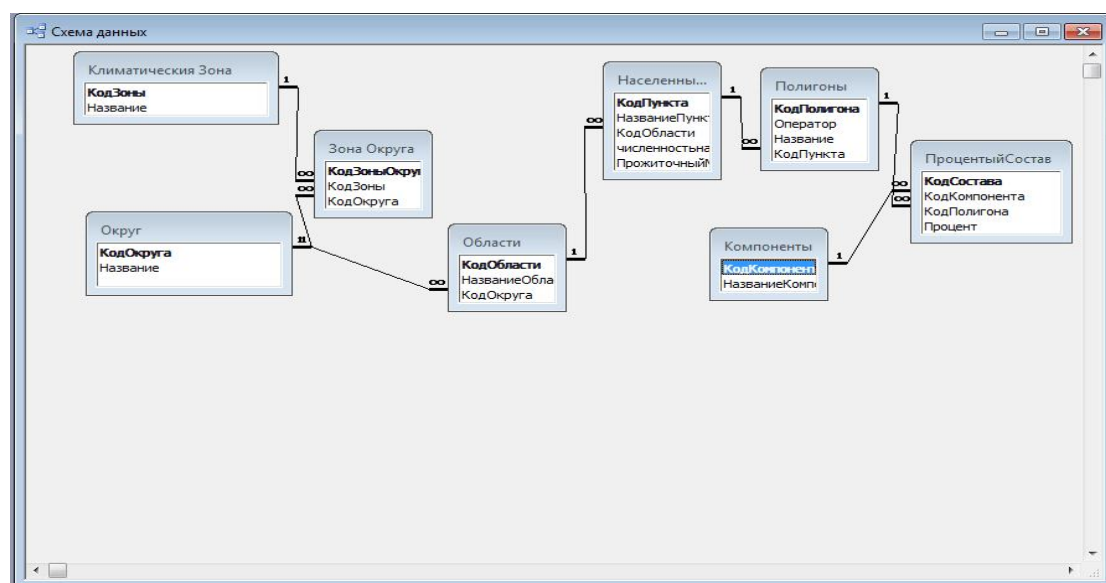


Рис. 3. Структура базы данных морфологического состава и объектов размещения ТКО

Выводы

Использование разработанной базы данных при оценке риска здоровью населения заключается в следующем. При идентификации опасности проектировщик рассчитывает валовые выбросы загрязняющих веществ от тела полигона (выход биогаза) с использованием приведенных выше программных продуктов. При этом содержание органической составляющей в отходах R будет приниматься не из методики [4] ($R = 55\%$), а на основании данных, взятых из предлагаемой базы данных, с учетом содержания в каждом компоненте ТКО биоразлагаемого углерода (см. табл. 5).

В случае, если в базе данных нет сведений ни по данному населенному

пункту, ни по объекту размещения отходов (полигону), то пользователь выбирает из базы данных населенный пункт, в максимальной мере соответствующий рассматриваемому по численности, прожиточному минимуму и климатической зоне, и соответственно принимает по нему морфологический состав отходов.

Таким образом, разработанная база данных морфологического состава и объектов размещения ТКО позволит, если не устранить, то максимально нивелировать неопределенности, возникающие при оценке риска здоровью населения от выбросов полигонов ТКО и, соответственно, повысит объективность получаемых результатов оценки риска.

Список литературы

1. О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года: Указ Президента РФ от 19.04.2017 № 176. Доступ из Справочно-правовой системы «Гарант».
2. Мальцева В.С., Юшин В.В. Анализ экологической ситуации в городе Курске // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2014. № 1. С. 105-113.
3. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. Р.2.1.10.1920–04. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 143 с.
4. Методика расчета количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых и промышленных отходов. М.: Москва, 2004. 48 с.
5. Информационные технологии в охране окружающей среды / И.О. Кирильчук, В.М. Попов, В.В. Юшин, В.В. Протасов. Курск, 2015. 212 с.
6. Чепиков Н.А., Рыкунова И.О., Юшин В.В. Совершенствование системы социально-гигиенического мониторинга региона с использованием IDEF-моделирования и ГИС // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №1 (40). С. 219-228.

7. Особенности процедуры оценки риска негативного воздействия объектов размещения отходов на окружающую среду и здоровье населения / В.В. Юшин, В.М. Попов, И.О. Кирильчук, А.Ю. Коровина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. № 3 (28). С. 36-49.

8. Управление метановым потенциалом ТБО путем их предварительной обработки / Г.В. Ильиных, Н.Н., Слюсарь Я.И. Вайсман, Ю.Б. Матвеев, А.Ю. Пухнюк // Экология и промышленность России. 2013. № 11. С. 38–42.

9. Ильиных Г.В. Геоэкологическая оценка технологий обработки твердых коммунальных отходов различного компонентного состава: дис... канд. техн. наук. М., 2016. 176 с.

10. Кирильчук И.О., Попов В.М., Юшин В.В. Основные подходы к разработке и построению автоматизированных информационно-аналитических систем управления отходами // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2016. №1 (18). С. 85-90.

Поступила в редакцию 27.02.2019

Подписана в печать 28.03.2019

Reference

1. Decree of the President of the Russian Federation of 19.04.2017 № 176 " On the Strategy of environmental security of the Russian Federation for the period up to 2025 ". Legal System"Garant".

2. Maltsev S. V., Yushin V. V. Analiz ekologicheskoy situatsii v gorode Kurske. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2014, no. 1, pp. 105-113 (In Russ.).

3. Guidelines for the assessment of public health risks from exposure to chemicals that pollute the environment. R. 2.1.10.1920-04. Moscow, 2004. 143 p. (In Russ.).

4. Method of calculation of quantitative characteristics of emissions of pollutants into the atmosphere from landfills of solid domestic and industrial waste. Moscow, 2004, 48 p. (In Russ.).

5. Kirilchuk I. O., Popov V. M., Yushin V. V., Protasov V.V. *Informatsionnyye tekhnologii v okhrane okruzhayushchey sredy. Kursk*, 2015, 212 p. (In Russ.).

6. Chepikov N. A., Rykunova I. O., Yushin V. V. Sovershenstvovaniye sistemy sotsial'no-gigiyenicheskogo monitoringa regiona s ispol'zovaniyem IDEF-modelirovaniya i GIS. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no.1 (40), pp. 219-228 (In Russ.).

7. Yushin V. V., Popov V. M., Kirilchuk I. O., Korovina A. Yu. Osobennosti protsedury otsenki riska negativnogo vozdeystviya ob'yektov razmeshcheniya otkhodov na okruzhayushchuyu sredu i zdorov'ye naseleniya. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo univer-*

siteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies, 2018, no. 3 (28), pp. 36-49 (In Russ.).

8. Ilyin, G. V., Slyusar N. N., Vaysman Ya. I., Matveev Yu. b., Punuk, A. Yu. Upravleniye metanovym potentsialom TBO putem ikh predvaritel'noy obrabotki. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2013, no. 11, pp. 38-42 (In Russ.).

9. Ilyin, G. V. Geoekologicheskaya otsenka tekhnologiy obrabotki tver-dykh kommunal'nykh otkhodov razlichnogo komponentnogo sostava. Diss. cand. tech sciences. Moscow, 2016, 176 p. (In Russ.).

10. Kirilchuk I. O., Popov V. M., Yushin V. V. Osnovnyye podkhody k razrabotke i postroyeniyu avtomatizirovannykh informatsionno-analiticheskikh sistem upravleniya otkhodami. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing engineering, Information science. Medical instruments engineering*. 2016, no.1 (18), pp. 85-90 (In Russ.).

Received 27.02.2019

Accepted 28.03.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Ираида Олеговна Кирильчук, кандидат технических наук, доцент кафедры охраны труда и окружающей среды, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: iraida585@mail.ru

Iraida O. Kirilchuk, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Labour and Environmental Protection, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: iraida585@mail.ru

Ольга Евгеньевна Кондратьева, доктор технических наук, доцент, завкафедрой инженерной экологии и охраны труда, МЭИ, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: KondratyevaOYe@mpei.ru

Olga E. Kondratieva, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Environmental Engineering and Labour Protection Department, MPEI, Moscow, Russian Federation, e-mail: KondratyevaOYe@mpei.ru

Олег Александрович Локтионов, аспирант, МЭИ, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: loktionovoa@yandex.ru

Oleg A. Laktionov, Post-Graduate Student, MPEI, Moscow, Russian Federation, e-mail: loktionovoa@yandex.ru

Василий Валерьевич Юшин, кандидат технических наук, доцент, завкафедрой охраны труда и окружающей среды, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: otios@mail.ru

Vasiliy V. Yushin, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Department of Labour and Environmental Protection, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ushinvv@mail.ru

К сведению авторов

1. К публикации в журнале «Известия Юго-Западного государственного университета» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2. Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

- статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;

- разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа.

- сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);

- лицензионный договор.

3. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами.

4. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

5. Публикация бесплатная.

6. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны – 2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

7. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (строчные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, список литературы. Авторы, название, аннотация и ключевые слова, список литературы приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается аннотация (200-250 слов), отражающая краткое содержание статьи.

8. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.

9. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный – 12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс – 5 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора – 75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы (Ω , η , β , μ , ω , ν и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций ($\sin$, $\cos$, $\tg$ и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – прямым шрифтом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF, JPEG, PNG) с разрешением не ниже 300 dpi и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. **Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы.**

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания **не допускаются.**

12. **Список литературы к статье обязателен** и должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы (не менее 10). Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 22-25-26, тел/факс (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Изменения и дополнения к правилам оформления статей и информацию об опубликованных номерах можно посмотреть на официальном сайте журнала: <https://science.swsu.ru>.